

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche  
Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université d'Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib



**Faculté : Sciences et technologies**  
**Département : Génie Electrique**  
**Laboratoire : SSL**



## ***THESE***

Présentée pour l'obtention du diplôme de **DOCTORAT**

**Domaine : Sciences et technologies**

**Filière : Electrotechnique**

**Option : Réseaux Electrique**

**Présenté par :**

**Nihed HEBBAR**

## **Thème**

**Effets des paramètres atmosphériques sur la décharge  
couronne dans différentes configurations des précipitateurs  
électrostatiques**

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

Mr. Mohammed FLITI	Prof. (Université d'Ain Temouchent)	Président
Mr. Massinissa AISSOU	Prof. (Université d'Ain Temouchent)	Encadreur
Mr. AIT SAID Hakim	Prof. (Université de Relizane)	Co-Encadreur
Mr. Farid MILOUA	Prof. (Université de Sidi Bel-Abbes)	Examinateur
Mr. Samir ZELMAT	Prof. (Université d'Ain Temouchent)	Examinateur
Mr. Thami ZEGHLOUL	Prof. (Université d'Angoulême)	Invité

Année Universitaire 2025/2026

# *Remerciements*

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur AISSOU Massinissa qui a assuré la direction de cette Thèse de Doctorat. Les nombreux conseils qu'il m'a donné, sa disponibilité ainsi que son écoute ont constitué un soutien précieux pour moi.*

*Je tiens à remercier monsieur AIT SAID d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse.*

*Je suis redevable à la contribution du Pr. Lucian DASCALESCU qui m'a dirigé au cours des dernières années de cette thèse. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance et mes profonds respects.*

*Je tiens à remercier monsieur le professeur Thami ZEGHLOUL Merci pour votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils. Je tiens à remercier spécialement Pr. Karim MEDLES.*

*Je remercie très chaleureusement les membres de l'équipe Tribo Electrostatique de l'institut Pprime à IUT d'Angoulême, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé*

*Je tiens enfin à remercier mes parents, les encouragements de ma chère maman, mon conjoint, ma fille et toute ma famille pour leur patience et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire et à toutes les personnes qui me sont chères pour leur soutien.*

*Résumé*

---

## Résumé :

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances des précipitateurs électrostatiques (ESP), dispositifs largement utilisés dans les procédés industriels pour le traitement des émissions particulaires. L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'influence des **conditions atmosphériques** — principalement l'humidité et la température — sur l'efficacité de collecte des particules dans différentes **configurations géométriques** de précipitateurs électrostatiques. Des expérimentations ont été menées en laboratoire sur des modèles réduits de précipitateurs de type **multipoints-deux plans**, et **lames-plan**. Trois types de particules de tailles et densités différentes ont été injectés pour évaluer la réponse des dispositifs dans des conditions variables. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence des comportements différenciés selon la configuration du précipitateur et les paramètres atmosphériques appliqués. Les résultats montrent que l'**humidité relative** influe fortement sur la formation de la décharge couronne et, par conséquent, sur le taux de captation des particules. La **température**, quant à elle, agit sur la densité de l'air et la mobilité ionique, modifiant ainsi les trajectoires des particules chargées. Ce qui impacte directement l'efficacité de collecte. Certaines configurations géométriques se sont révélées plus robustes que d'autres face à ces variations environnementales.

**Mots clés :** Décharge couronne, Précipitateur électrostatique, Fines particules, Particules collectées, humidité, Température.

## Abstract:

The aim of this research project is to improve the performance of electrostatic precipitators (ESPs), devices widely used in industrial processes to treat particulate emissions. The main objective of this thesis is to study the influence of atmospheric conditions - mainly humidity and temperature - on the particle collection efficiency in different geometric configurations of electrostatic precipitators. Experiments have been carried out in the laboratory on model precipitators of the multipoint-two planes, and blade-planes types. Three types of particles of different sizes and densities were injected to evaluate the response of the devices under varying conditions. Analysis of the results revealed differentiated behaviours depending on the precipitator configuration and the atmospheric parameters applied. The results show that relative humidity has a strong influence on corona discharge formation and, consequently, on particle capture rates. Temperature, on the other hand, affects air density and ion mobility, modifying the trajectories of charged particles, which has a direct impact on collection efficiency. Certain geometrical configurations proved more robust than others in the face of these environmental variations.

---

---

**Keys words:** Corona discharge, Electrostatic precipitator, Particles fines, Particle collected, humidity, temperature.

### **ملخص**

يعد هذا العمل البحثي جزءًا من تحسين أداء أجهزة الترسيب الكهروستاتيكي (ESP)، وهي أجهزة تستخدم على نطاق واسع في العمليات الصناعية لمعالجة الانبعاثات الجسيمية. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير الظروف الجوية -خاصة الرطوبة ودرجة الحرارة -على كفاءة جمع الجسيمات في التكوينات الهندسية المختلفة للمرسبات الكهروستاتيكية. تم إجراء التجارب في المختبر على نماذج مخفضة من المرسبات متعددة النقاط ذات المستويين والمستويين الشفريين. تم حقن ثلاثة أنواع من الجسيمات ذات أحجام وكثافات مختلفة لتقييم استجابة الأجهزة في ظل ظروف مختلفة. وأظهر تحليل النتائج سلوكيات متباينة اعتمادًا على تكوين المرسب والمعلقات الجوية المطبقة. وتظهر النتائج أن الرطوبة النسبية لها تأثير قوي على تشكيل التفريغ الإكليلي، وبالتالي على معدل التقاط الجسيمات. وتؤثر درجة الحرارة، بدورها، على كثافة الهواء وحركة الأيونات، وبالتالي تعديل مسارات الجسيمات المشحونة، مما يؤثر بشكل مباشر على كفاءة التجميع. لقد أثبتت بعض التكوينات الهندسية أنها أكثر قوة من غيرها في مواجهة هذه الاختلافات البيئية.

### **الكلمات الرئيسية**

التفريغ كورونا، المرسب الكهربائي، والجسيمات الدقيقة، بخار الماء، الجسيمات المجمعة الحرارة

---

*Nomenclature*

## **Lettres latines**

$a$  : distance entre deux fils voisins.

$A$  : constante dépendant principalement de la géométrie des électrodes.

$B$  : constante.

$C$  : constante dépend de la configuration des électrodes, mobilité, température et pression.

$C_0$  : La capacité entre les deux surfaces ( $E_1$ ) et ( $S_0$ ).

$D_e$  : Vecteur déplacement électrique.

$d$  : distance entre deux électrodes (nappe de fils-plan).

$d_c$  : distance critique pour que le streamer puisse se développer.

$d_p$  : diamètre de la sphère diélectrique.

$e$  : charge élémentaire ( $=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ).

$E$  : champ électrique.

$E_0$  : champ seuil d'un conducteur non poli.

$E_c$  : champ critique d'ionisation.

$E_b$  : champ de polarisation.

$E_i$  : champ électrique à la surface du fil.

$E_p$  : champ de la charge d'espace.

$F$  : constante.

$F_{DEP}$  : force diélectrophorétique.

$F_e$  : force de coulomb.

$g$  : intervalle d'air entre la sonde et l'électrode ( $E_1$ ).

$G$  : constante.

$H_f$  : humidité relative.

$I$  : courant moyen de la décharge.  $I_0$  : courant initial au plan ( $x=0$ ).

$I_f$  : courant de fuite.

$I_S$  : courant collecté par la sonde pour  $V_b \neq 0$ .

$I_{S0}$  : courant collecté par la sonde pour  $V_b = 0$ .

$I_{Sm}$  : courant mesuré en appliquant une tension à l'électrode et en polarisant la plaque.

---

J : Densité de courant.

$J_n$  : densité de courant normale.

$J_t$  : densité de courant tangentielle.

K : constante.

l : longueur de plan de garde.

L : largeur de plan de garde.

$L_f$  : longueur du fil.

$N_0$  : nombre d'électrons initiaux au plan ( $x=0$ ).

P : pression du gaz inter-électrodes.

$P_e$  : pente de la caractéristique  $I_s/I_{s0}=f(V_b)$ .

$P_g$  : plan de garde.

$q_p$  : charge électrique.

r : rayon de courbure de la pointe.

R : rayon du cylindre équivalent

$r_0$  : rayon de l'électrode active (fil).

$R_0$  : résistance haute tension.

$r_c$  : frontière de l'ionisation.

$r_e$  : rayon intérieur de l'électrode.

$R_e$  : rayon extérieur de l'électrode ( $E_1$ ).

$r_m$  : rayon effectif de la sonde.

$r_s$  : rayon réel de la sonde.

$R_u$  : résistance du voltmètre crête

$S_E$  : section de l'électrode.

$S_s$  : section réelle de la sonde.

T : température.

$U_{app}$  : tension appliquée à la nappe de fils.

$U_s, V_s$  : tension seuil de l'effet couronne.

v : vitesse d'écoulement de l'air.

$v_i$  : vitesse des ions contenus dans le gaz.

---

$V$  : différence de potentiel appliquée entre deux électrodes.

$V_0$  : tension seuil de l'effet couronne.

$V_{al}$  : tension d'alimentation du ventilateur.

$V_b$  : tension de polarisation de la sonde.

$V_c$  : tension de claquage.

$x$  : abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de l'électrode active

$X_c$  : distance par rapport à la surface de la nappe.

### **Lettres Grecques**

$\alpha$  : premier coefficient de Townsend.

$\delta$  : densité relative du gaz.

$\gamma$  : deuxième coefficient de Townsend

$\eta$  : coefficient d'attachement.

$\epsilon_0$  : permittivité électrique du vide ( $=8,85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ).

$\epsilon_m$  : permittivité du milieu.

$\epsilon_s$  : permittivité de la sphère diélectrique.

$\mu$  : mobilité électrique moyenne des ions.

$\mu+$  : mobilité électrique moyenne des ions positifs.

$\mu-$  : mobilité électrique moyenne des ions négatifs.

$\rho$  : densité de la charge d'espace.

$\rho_g$  : masse volumique du gaz.

$\sigma$  : conductivité électrique.

---

*Liste des figures et des  
tableaux*

<b>Figure I.1</b> – Différentes configurations de décharge couronne.....	<b>5</b>
<b>Figure I.2</b> – Caractéristique courant-tension.....	<b>6</b>
<b>Figure I.3</b> – Topographie de la décharge couronne.....	<b>7</b>
<b>Figure I.4</b> – Schématisation d'une décharge couronne continue positive.....	<b>10</b>
<b>Figure I.5</b> – Schématisation d'une décharge couronne continue négative.....	<b>10</b>
<b>Figure I.6</b> – Descriptif de la décharge couronne négative.....	<b>10</b>
<b>Figure I.7</b> – Descriptif de la décharge couronne positive.....	<b>11</b>
<b>Figure I.8</b> – Diagramme schématique montrant la transition streamer.....	<b>15</b>
<b>Figure I.9</b> – Les deux étapes du mécanisme de la décharge.....	<b>16</b>
<b>Figure I.10</b> – Courbe de Paschen pour l'air à 20 °C.....	<b>19</b>
<b>Figure I.11</b> – a) Système triode b) Polarité négative c) Polarité positive.....	<b>22</b>
<b>Figure I.12</b> – Exemples de dispositifs industriels de filtration de l'air.....	<b>23</b>
<b>Figure I.13</b> – Principales étapes intervenant dans le fonctionnement.....	<b>24</b>
<b>Figure I.14</b> – Représentation schématique d'un séparateur .....	<b>25</b>
<b>Figure I.15</b> – Schéma descriptif du procédé de traitement.....	<b>26</b>
<b>Figure I.16</b> – Schématisation d'un système nappe de fils.....	<b>28</b>
<b>Figure II. 1</b> – Gamme de taille des particules en suspension dans l'air.....	<b>38</b>
<b>Figure II.2</b> – Estimation du nombre de charges élémentaires .....	<b>44</b>
<b>Figure II.3</b> – Variations de la charge des particules .....	<b>45</b>
<b>Figure II.4</b> -Electrofiltres classiques à un étage : (a) fil / cylindre [30] et (b) fil / plan.....	<b>46</b>
<b>Figure II.5</b> – Electrofiltre de type plan / plan : (a) à un étage [32] et (b) à deux étages .....	<b>48</b>
<b>Figure II.6</b> – Electrofiltres : (a) sec [33] et (b) humide .....	<b>49</b>
<b>Figure II.7</b> – Illustration schématique du modèle laminaire .....	<b>50</b>
<b>Figure II.8</b> – Modèle de Deutsch.....	<b>51</b>

## *La liste des figures et des tableaux*

<b>Figure II.9</b> – Effets du coefficient de diffusivité turbulente ( $D_t$ ) .....	<b>53</b>
<b>Figure II.10</b> – Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte .....	<b>55</b>
<b>Figure II.11</b> – Illustration du phénomène de ré-entraînement anormal des particules .....	<b>56</b>
<b>Figure II.12</b> – Variations de la vitesse de migration théorique .....	<b>57</b>
<b>Figure III.1</b> – Système d'ionisation .....	<b>68</b>
<b>Figure III.2</b> – Dispositif expérimental .....	<b>69</b>
<b>Figure III.3</b> – Electromètre numérique Keithley, modèle 6514 .....	<b>70</b>
<b>Figure III.4</b> – Source de Haute Tension modèle Glassman, séries LT .....	<b>71</b>
<b>Figure III.5</b> – Balance numérique KERN 440-47N .....	<b>71</b>
<b>Figure III.6</b> – Anémomètre avec sonde à hélice intégrée testo 417 .....	<b>72</b>
<b>Figure III.7</b> – Thermo-hygromètre Testo 625 .....	<b>72</b>
<b>Figure III.8</b> – Autotransformateur .....	<b>73</b>
<b>Figure III.9</b> – Souffleur aspirateur électrique .....	<b>75</b>
<b>Figure III.10</b> – effet de la vitesse sur les caractéristiques I/V .....	<b>77</b>
<b>Figure III.11</b> – Courant corona au collecteur ESP .....	<b>78</b>
<b>Figure III.12</b> – courant corona en fonction de la tension appliquée .....	<b>80</b>
<b>Figure III.13</b> – efficacité de collecte en fonction de la tension .....	<b>81</b>
<b>Figure III.14</b> – Efficacité de collecte des électrodes .....	<b>82</b>
<b>Figure III.15</b> – Effet de la polarité pour différentes électrodes .....	<b>83</b>
<b>Figure III.16</b> – Efficacité de collecte de masse de particules .....	<b>84</b>
<b>Figure IV.1</b> - Dispositif expérimental .....	<b>92</b>
<b>Figure IV.2</b> - Système d'ionisation. ....	<b>93</b>
<b>Figure IV.3</b> – Photographie d'une décharge corona multi-pointes .....	<b>93</b>
<b>Figure IV.4</b> Alimentation haute tension de 0 à -30 kV .....	<b>95</b>
<b>Figure IV.5</b> – Balance numérique KERN 440-47N. ....	<b>95</b>
<b>Figure IV.6</b> – a) Photographie de la machine de contrôle .....	<b>97</b>

*La liste des figures et des tableaux*

<b>Figure IV.7</b> – nterface utilisateur pour le pilotage du banc d’essais.....	<b>98</b>
<b>Figure IV.8</b> – Caractéristique courant-tension de la couronne négative .....	<b>99</b>
<b>Figure IV.9</b> – Caractéristique courant-tension de la couron positive.....	<b>100</b>
<b>Figure IV.10</b> – Variation de la densité de courant avec la température .....	<b>101</b>
<b>Figure IV.11</b> – Variation de la densité de courant avec la température .....	<b>101</b>
<b>Figure IV.12</b> – Variation de la tension.....	<b>102</b>
<b>Figure IV.13</b> – la caractéristique courant- tension .....	<b>103</b>
<b>Figure IV.14</b> – Efficacité de collecte de masse de particules.....	<b>103</b>
<b>Figure IV.15</b> – Variation de l'efficacité de collecte. ....	<b>104</b>
<b>Figure IV.16</b> – les processus de décharge de particules.....	<b>105</b>
<b>Figure IV.17-</b> le potentiel caractéristique de décharge.....	<b>106</b>
<b>Figure IV.18</b> – : Effet de potentiel sur l’efficacité de collecte .....	<b>108</b>
<b>Figure IV.19</b> – les particules du plan collecteur.....	<b>107</b>
<b>Figure IV.20</b> – Effet du flux massique sur la collecte des particules .....	<b>108</b>
<b>Figure IV.21</b> – effet de l’humidité relative sur la caractéristique courant-tension .....	<b>109</b>
<b>Figure IV.22</b> – Effet de l'humidité relative sur la collecte .....	<b>110</b>
<b>Figure IV.23</b> – Effet de l'humidité relative sur la caractéristique I/V .....	<b>112</b>
<b>Figure IV.24</b> – Effet de l'humidité relative sur l’efficacité .....	<b>113</b>
<b>Tableau II.1</b> – Le pourcentage de particules.....	<b>41</b>

# *Sommaire*

**Introduction générale ..... 1**

***Chapitre I : APPROCHE PHYSIQUE DE LA DECHARGE COURONNE***

**I.1 Introduction ..... 4**

**I.2 La décharge couronne ..... 4**

**I.3 Mécanismes de formation et processus physiques des décharges électriques..... 5**

**I.3.1 Polarité de la décharge couronne ..... 5**

**I.3.2 Couronne positive ..... 5**

**I.3.3 Couronne négative ..... 5**

**I.3.4 Stabilité du phénomène..... 5**

**I.3.5 Apparence lumineuse ..... 5**

**I.3.6 Source des électrons germes ..... 5**

**I.3.7 Collisions élastiques et inélastiques ..... 5**

**I.3.8 Décharge électrique dans les gaz..... 5**

**I.4 Phénomènes dans les décharges à haute pression ..... 9**

**I.4.1 Les avalanches..... 9**

**I.4.2 Les décharges par avalanches successives ..... 10**

**I.4.3 Les ondes d'ionisation ou streamer ..... 11**

**I.4.4 Théorie de Townsend**

**I.4.5 La loi de Paschen**

**I.5 Notion du vent électrique..... 19**

**I.6 Applications de la décharge couronne dans le domaine industriel..... 22**

**I.6.1 Précipitateurs électrostatiques ..... 24**

I.6.2 Séparateurs électrostatiques industriels.....	24
I.6.3 Les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs .....	26
<b>I.7 Modèle mathématique de la décharge couronne pour les PES.....</b>	<b>27</b>
<b>I.8 Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>31</b>

## ***Chapitre II : Précipitateurs électrostatiques d'aérosols***

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>35</b>
<b>II.2 Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement .....</b>	<b>35</b>
<b>II.3 I.4 Forces à l'origine de la migration des particules chargées.....</b>	<b>40</b>
II.3.1 Force de Coulomb .....	40
II.3.2 Force diélectrophorétique.....	41
<b>II.4 Mécanismes de charge des particules .....</b>	<b>41</b>
II.4.1 La charge par champ.....	42
II.4.2 La charge par diffusion .....	43
II.4.3 La charge mixte.....	44
<b>II.5 Architecture des précipitateurs électrostatiques.....</b>	<b>44</b>
II.5.1 Electrofiltres à un seul étage .....	44
II.5.2 Electrofiltres à double étage.....	45
II.5.3 Electrofiltres humides .....	46
<b>II.6 Modèles du fonctionnement d'un électrofiltre .....</b>	<b>48</b>
II.6.1 Modèle laminaire .....	48
II.6.2 Modèle de Deutsch .....	49
II.6.3 Modèle de Leonard, Mitchner et Self .....	50
<b>II.7 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte .....</b>	<b>51</b>

---

II.7.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre .....	51
II.7.2 Le ré-entraînement de particules .....	52
II.7.3 Le back corona.....	53
II.7.4 Influence de la taille des particules .....	54
II.7.5 L'extinction de la décharge par la charge d'espace .....	54
<b>II.8 Applications de précipitateurs industriels.....</b>	<b>55</b>
<b>II.9 Avantages des précipitateurs électrostatiques .....</b>	<b>55</b>
<b>II.10 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques .....</b>	<b>55</b>
<b>II.11 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique.....</b>	<b>57</b>
<b>II.12 Conclusion .....</b>	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>59</b>

***Chapitre III : Étude expérimentale de l'efficacité de collecte de trois configurations de précipitateur électrostatique à lames-plan***

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>62</b>
<b>III.2 Description du dispositif expérimental .....</b>	<b>62</b>
<b>III.3 Méthode de mesure .....</b>	<b>64</b>
III.3.1 Mesure de la tension appliquée.....	64
III.3.2 Mesure de la masse des particules.....	65
III.3.3 Mesure de la vitesse du vent appliqué .....	66
III.3.4 Mesure des conditions atmosphériques .....	66
III.3.5 La régulation de la vitesse du vent appliquée .....	66
III.3.6 Analyse chimique des particules injectées.....	66

---

<b>III.4 Résultats expérimentaux</b> .....	<b>69</b>
III.4.1 Effet de la vitesse de migration des particules sur la caractéristique I(V) .....	69
III.4.2 Mesure de la caractéristique courant-tension des particules injectées .....	70
III.4.3 Effet du diamètre des particules sur la caractéristique I(V) .....	73
III.4.4 Effet du diamètre des particules sur l'efficacité de collecte des particules.....	76
III.4.5 Effet de la géométrie de l'électrode sur l'efficacité de collecte des particules .....	79
III.4.6 Effet de la forme de l'électrode sur l'efficacité de collecte des particules.....	82
III.4.7 Effet de la polarité sur l'efficacité de collecte des particules.....	84
<b>III.5 Conclusion</b> .....	<b>84</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>89</b>

***Chapitre IV :Etude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques  
'humidité- température' sur la décharge couronne dans une configuration  
de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

<b>IV.1 Introduction</b> .....	<b>91</b>
<b>IV.2 Caractérisation électrique de la décharge couronne</b> .....	<b>92</b>
<b>IV.3 Description du dispositif expérimental</b> .....	<b>95</b>
<b>IV.4 Le banc expérimental</b> .....	<b>96</b>
IV.4.1 La zone d'ionisation .....	96
IV.4.2 L'électrode active.....	96
IV.4.3 Le choix des électrodes.....	96
<b>IV.5 Méthode de mesure</b> .....	<b>100</b>
IV.5.1 Mesure de la tension appliquée .....	103
IV.5.2 Mesure de masse des particules .....	103

---

<b>IV.6 Dispositif de contrôle de l'humidité et de la température ambiant</b> .....	106
IV.6.1 Mesure de potentiel de surface.....	108
IV.6.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle.....	108
<b>IV.7 Résultats expérimentaux</b> .....	<b>84</b>
IV.7.1 L'étude expérimentale de l'effet de température .....	69
IV.7.2 La caractéristique de courant –tension .....	69
IV.7.3 La densité de courant de l'électrode active .....	69
IV.7.4 La tension d'amorçage .....	69
IV.7.5 Efficacité de collecte .....	69
IV.7.6 Mesure de potentiel de surface des électrodes passives .....	69
IV.7.7 L'uniformité de la charge.....	69
<b>IV.8 L'étude expérimentale de l'effet de température</b> .....	<b>69</b>
IV.8.1 Effet du flux massique des particules de ciment (g/s).....	69
<b>IV.9 Effet de l'humidité relative sur les caractéristiques courant-tension à vide</b> .....	<b>69</b>
IV.9.1 Effet de l'humidité relative sur l'efficacité de collecte de l'ESP .....	69
IV.9.2 Effet de l'humidité relative sur la caractéristique courant/tension.....	69
IV.9.3 Impact de l'humidité sur l'efficacité de la collecte .....	69
<b>IV.10 Conclusion</b> .....	<b>114</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>116</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>120</b>

---

*Introduction générale*

Des applications industrielles de l'électrostatique pour manipuler des particules ou des gouttelettes en suspension sont actuellement utilisées dans de nombreux domaines : peinture et poudrage électrostatiques, précipitation électrostatique (PES), pulvérisation électrique de liquides, guidage électrostatique de poudres (par rideaux électriques) et séparation électrostatique de granules ... etc. [1-2]. Dans tous ces cas, les particules ou gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Alors, sous l'effet du champ électrique, elles sont dirigées ou entraînées vers une cible, une zone de capture ou de séparation [6].

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont déjà été réalisées sur la décharge couronne car elle peut être appliquée non seulement pour modifier la structure chimique de surface des polymères, mais également comme technique efficace de génération d'ozone et de charge électrique pour la pulvérisation de poudre, la peinture électrostatique, la décontamination et la séparation électrostatique [3].

L'effet couronne est une décharge électrique entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur, elle se produit lorsque le potentiel électrique dépasse une valeur critique mais les conditions ne permettent pas la formation d'un arc. Une décharge couronne se produit lorsqu'un courant continu ou non, se crée entre deux électrodes portées en haut potentiel et séparées par un fluide neutre, en générale l'air, par ionisation de ce fluide. Un plasma est alors créé et les charges électriques se propagent. Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment grand, l'intervalle d'air inter électrodes commence à s'ioniser à partir d'une certaine valeur de la tension appliquée à l'électrode active, dite tension seuil d'apparition de la décharge couronne [6].

Les décharges couronnes se produisent donc aux voisinages d'électrode de rayon de courbure faible (un fil métallique) où le champ électrique est important pour permettre la formation d'un plasma et une autre de rayon de courbure important (une plaque métallique ou la terre).

La décharge couronne présente des aspects utiles recherchés pour ses nombreuses applications (dépôt de charge en reprographie, traitement de surfaces métalliques et

isolantes, textiles, applications biologiques, dépoussiéreur électrique, ...) et des aspects nuisible (pertes d'énergie dans les lignes de transmission, perturbations radioélectriques, défaut d'isolement, l'apparition de phénomène de corrosion ... etc.). De ce fait, une bonne compréhension des phénomènes de la décharge, nécessite une étude théorique et expérimentale.

La précipitation électrostatique est un procédé industriel utilisé pour l'élimination efficace des cendres transportées par les fumées et des poussières présentes dans l'air, grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées. Les précipitateurs électrostatiques (PES) [7] appelés également électrofiltres ou dépoussiéreurs électrostatiques, sont des installations largement utilisées depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle pour épurer les fumées. Ils prennent une part importante dans la filtration des rejets industriels dans l'atmosphère. Les dépoussiéreurs électrostatiques sont actuellement les séparateurs les plus utilisés par l'industrie, en particulier pour les grands débits gazeux. On les trouve, par exemple, dans les industries métallurgiques et chimiques ou celle du ciment, ainsi que pour traiter les fumées produites par les centrales électriques brûlant du charbon pulvérisé. Le succès de ce procédé s'explique par la grande efficacité de filtration et la faible perte de charge dans ces installations de traitement. De nos jours, la qualité de l'air est devenue une préoccupation majeure qui a de nombreux impacts sur la santé, la vie et les activités de l'homme. Les électrodes couronne sont généralement composées de pointes, de fils ou de lames connectés à une alimentation haute tension [7]. L'uniformité de la charge électrique déposée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne dépend de l'uniformité du champ électrique généré par ces électrodes. Par conséquent, l'uniformité du champ électrique qu'elle génère est un indicateur de qualité important pour toute électrode couronne [7].

Les électrodes filaires et lames génèrent des décharges couronne assez uniformément réparties le long de l'élément émetteur. Les électrodes de type pointes génèrent une décharge moins uniforme [6]. Cependant, elles se caractérisent par des tensions d'apparition de l'effet couronne plus faibles, ce qui justifie l'effort d'optimisation de leur géométrie en vue de minimiser le degré de non-uniformité des décharges générées par ces électrodes, en relation avec les exigences des applications envisagées, telles que le chargement par décharge couronne de mélanges granulaires en vue de la séparation électrostatique de leurs constituants.

Ce travail a été réalisé en deux parties : laboratoire de génie électrique de l'université Belhedj Bouchaib de Ain Temouchent au niveau de laboratoire des structures intelligentes. Il s'agit de mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques tels que l'espace inter électrodes et les paramètres physiques sur les caractéristiques de la décharge couronne. L'objectif de l'expérimentation est d'analyser l'impact de la décharge couronne dans différentes configurations géométriques pour évaluer leur efficacité dans le processus de dépoussiérage électrostatique. Afin de souligner l'importance des diverses études expérimentales menées pour éclairer les mécanismes de la décharge dans les précipitateurs électrostatiques. Le présent travail est structuré en plusieurs chapitres. Tous ces chapitres comportent une revue bibliographique et un développement d'idées, de sorte que chacun d'entre eux peut être lu séparément, sans perte de clarté. Par conséquent, le manuscrit comporte quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre intitulé « Approche physique de la décharge couronne»: cette partie est un bref rappel des notions de base de physique des décharges indispensables pour aborder le travail expérimental.
- Le deuxième chapitre, « Précipitateurs électrostatiques d'aérosols » : désigne les principales composantes des précipitateurs électrostatiques d'aérosols seront exposées, ainsi que leur mécanisme de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques liées à leur précipitation électrostatique. Nous avons examiné les diverses façons dont les particules sont chargées et les forces qui entraînent la migration des particules chargées.
- Le troisième chapitre intitulé, « Étude expérimentale de l'efficacité de collecte de trois configurations de précipitateur électrostatique à lames-plan » : analyse l'influence des propriétés électriques des particules dans un assemblage à électrodes multiples, ainsi que les performances prévues de trois types d'électrodes, lame de scie et lame.
- Dans le dernier chapitre, « Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité- température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans » : Examine l'impact des facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité sur la décharge couronne obtenue lors de l'installation des électrodes actives de type "pointes" dans un système de précipitation électrostatique.

*Chapitre I*

**APPROCHE  
PHYSIQUE DE LA  
DECHARGE  
COURONNE**

## **I.1 Introduction**

Les charges électriques libres présentes dans l'atmosphère sont le résultat d'agents ionisants externes permanents tels que le rayonnement cosmique et la radioactivité naturelle. En général, il n'existe pas de gaz qui soient des isolants électriques idéaux. Par collisions ionisantes avec les atomes et les molécules du gaz, ces charges peuvent se multiplier dans l'air ambiant. On appelle décharges électriques ces phénomènes de conduction.

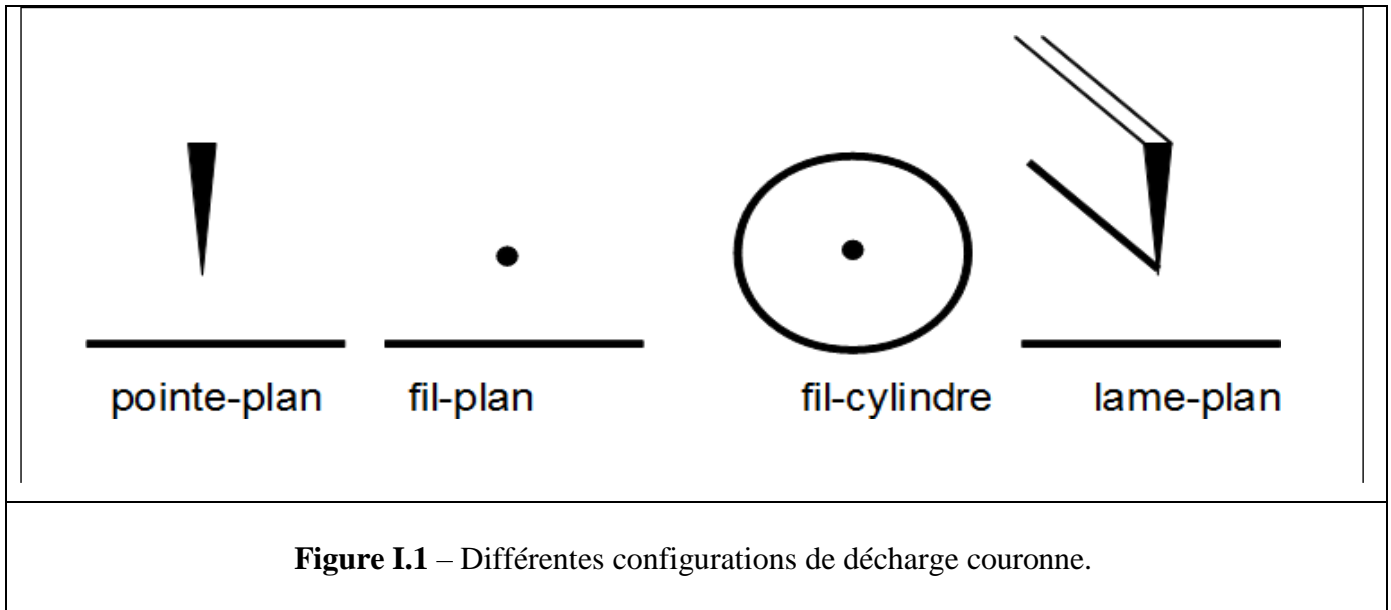
La décharge couronne est un phénomène complexe qui se distingue par ses différents mécanismes et ses multiples applications potentielles. Ce phénomène physique se manifeste à travers une gaine de points ou de lignes lumineuses autour de l'électrode active, ce qui détermine sa configuration géométrique et la linéarisation avec l'ionisation du milieu gazeux qui les entoure.

Le premier chapitre, sera consacré à l'étude générale du mécanisme de la décharge couronne utilisée pour la charge des poussières en vue de leur caractérisation physique électrique et mathématique des différentes évolutions qui conduisent à la production d'espèces réactives et à leur dispersion.

## **I.2 La décharge couronne**

La décharge couronne est l'ensemble des phénomènes associés à l'émergence d'une conductivité d'un gaz près d'un conducteur porté à une tension où le champ électrique environnant est puissant mais non disruptif. L'ionisation est responsable de cette conductivité. Le développement de ce genre de décharge ne requiert aucune source externe d'ionisation, ce qui en fait une décharge autonome. Pour commencer la décharge, il est néanmoins indispensable d'avoir un électron initial [1, 2].

Le processus de décharge couronne est l'une des techniques les plus couramment employées pour produire du plasma à pression atmosphérique. Elle a lieu entre deux électrodes asymétriques (active et passive) en utilisant un champ électrique intense : L'électrode active de faible rayon de courbure (ex. une pointe, lame, une double électrode, un fil mince ou une nappe de fil) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (ex. une plaque plate ou un cylindre) est mise à la terre [3, 4]. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique fortement inhomogène et suffisamment élevé dans l'espace inter-électrodes.



### I.3 Mécanismes de formation des décharges électriques

Un électron placé dans un champ électrique uniforme ( $E = V/d$ , où  $V$  est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes de distances  $d$ ) est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules, tel que  $A_t + e^- \rightarrow A_t + 2e^-$ . L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive est connu sous le nom d'«avalanche électronique» ou de «décharge de Townsend».

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il est nécessaire que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces métastables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouvel électron.

Sous l'influence du champ électrique appliqué, toutes les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace inter électrodes et générer un courant électrique, le courant de décharge.

La figure (1.2) décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée.

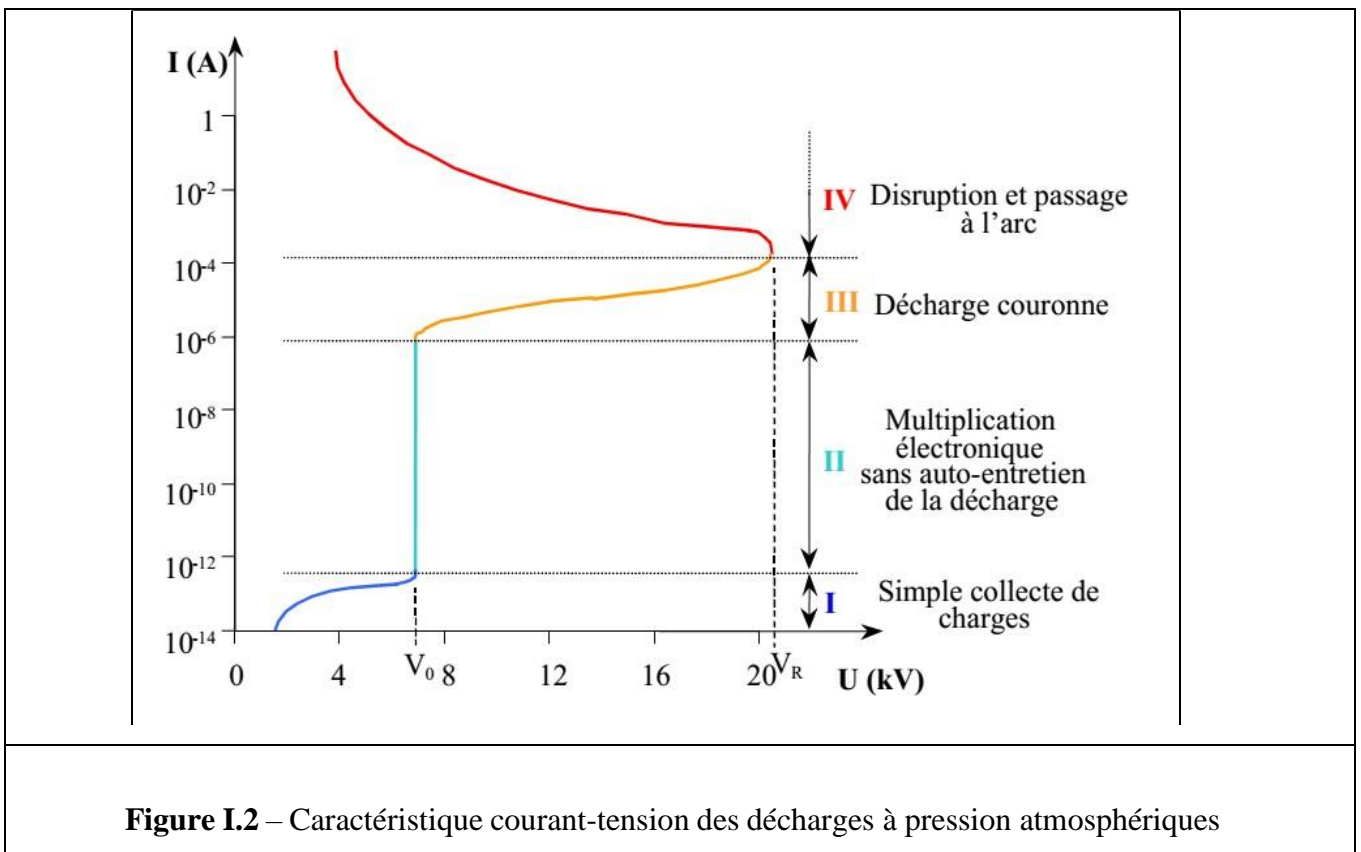
La courbe permet de distinguer quatre régimes [5]

**Régime I** : le courant est très faible, dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou du rayonnement cosmique. Dans ce cas, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.

**Régime II** : lorsque la tension atteint une valeur seuil  $V_0$ , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible.

**Régime III** : la décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.

**Régime IV** : les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter électrodes. C'est le régime des décharges disruptives telles que les arcs électriques.



Les décharges couronnes se situent dans le régime III de la Figure (1.1). La décharge est classiquement établie entre une électrode active et une électrode passive (électrode reliée à la terre). L'électrode active est une pointe (ou un fil de petit diamètre) à laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est une plaque ou une grille (Figure 1.2).

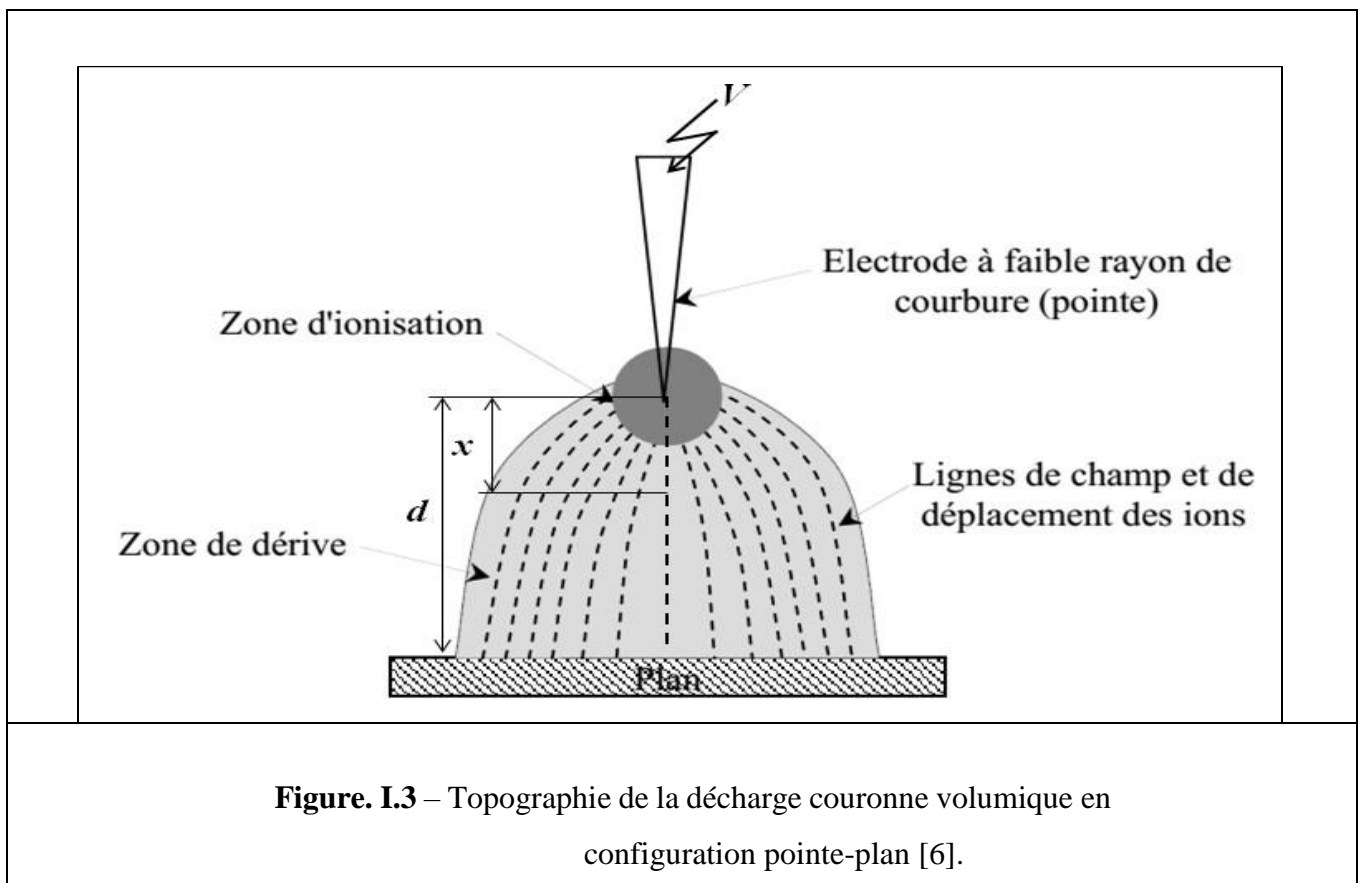
On obtient alors une décharge couronne volumique. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter électrodes. En l'absence de charge d'espace, Hartmann [6] en 1977 a établi une expression du champ électrique  $E$  en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie  $x$  :

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln\left[\frac{2d+r}{r}\right]} \quad (1.1)$$

Avec

$V$ : la différence de potentiel,  $d$ : la distance inter électrodes,  $r$ : le rayon de courbure de la pointe et  $x$ : l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine.

$$E(x) = E_i \frac{r}{x} \quad (1.2)$$



Par ailleurs, la décharge couronne est le siège d'une forte activité physicochimique. Enfin, selon la polarité du potentiel appliqué à la pointe on distingue la décharge couronne positive de la décharge couronne négative.

I.3.1 Polarité de la décharge couronne

I.3.2 Couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand le fil est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de fil, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l’anode (le fil). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé de la figure (I.4). Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l’anode, sous l’effet des forces de Coulomb, jusqu’à une distance de fil (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ( $< 30 \text{ kV/cm}$  dans l’air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d’ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers le plan mis à la terre.

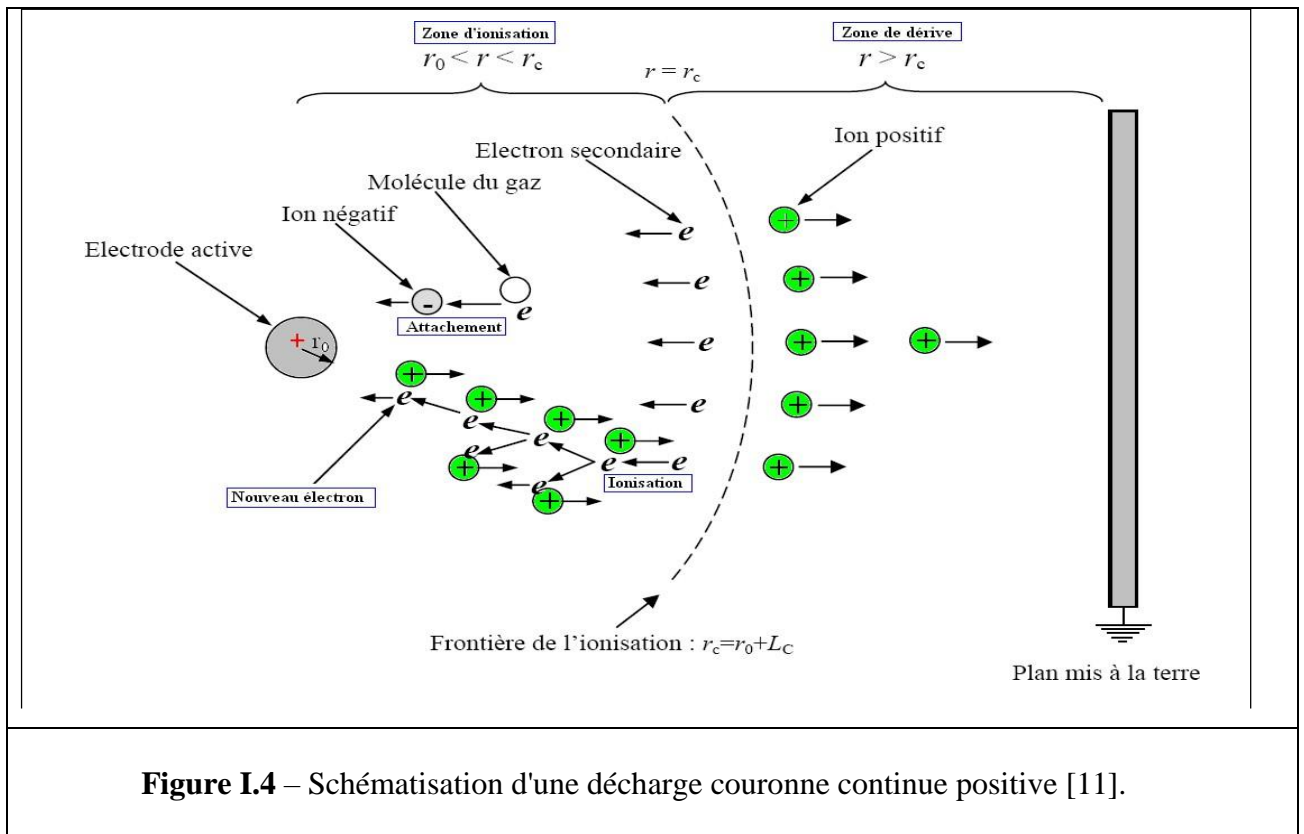


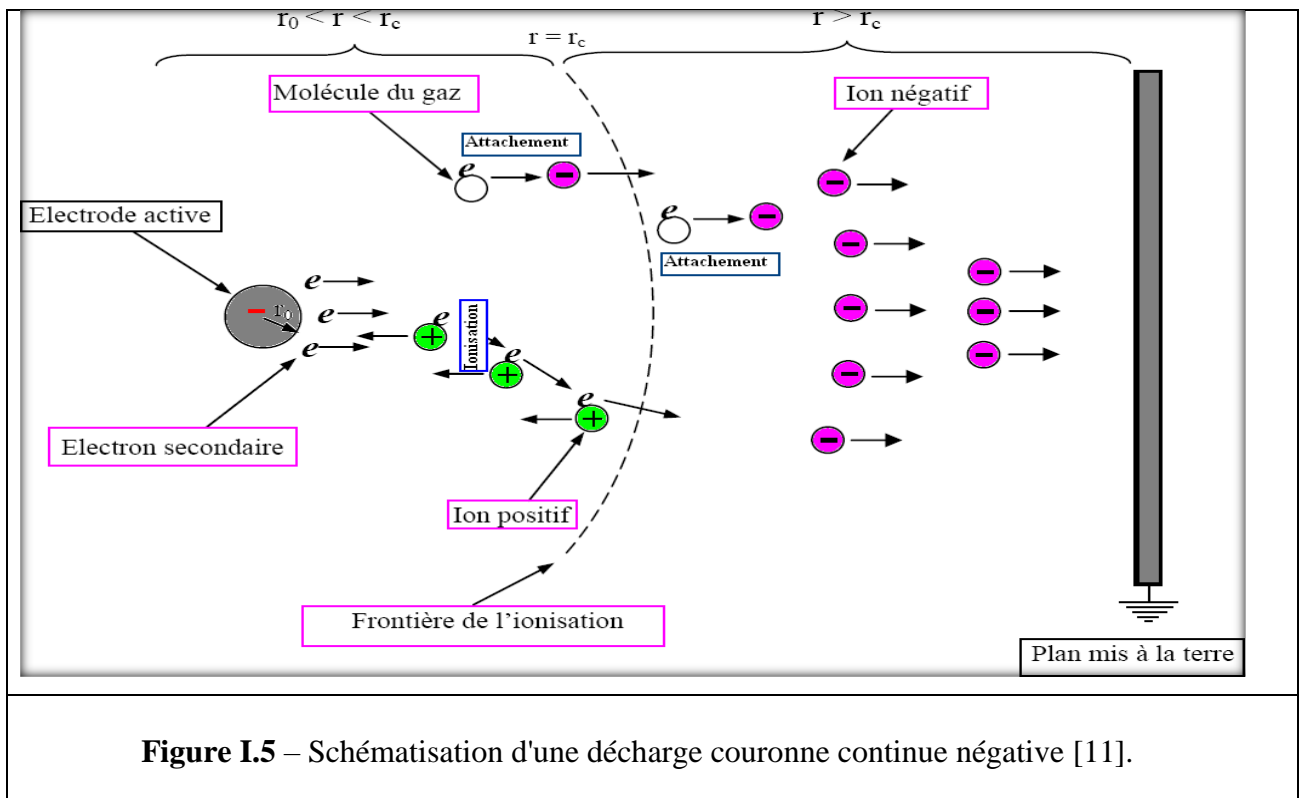
Figure I.4 – Schématisation d'une décharge couronne continue positive [11].

Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs [8], est appelée région de « dérive» (Figure I.4). Pour cette décharge, il y'a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. D'après les modélisations de Loiseau et al. [9], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$ ) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent.

Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al. [10] indique qu'un courant positif de 50  $\mu\text{A}$  se décomposerait en un courant unipolaire continu de 20  $\mu\text{A}$ , distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à 30  $\mu\text{A}$  percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz.

### I.3.3 Couronne négative

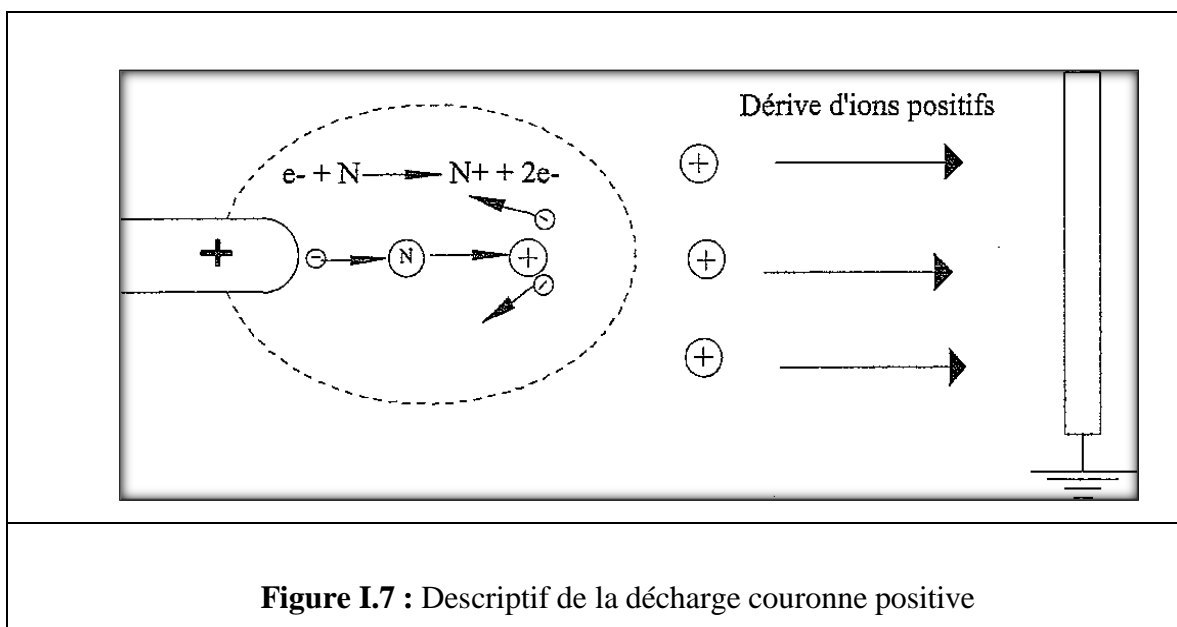
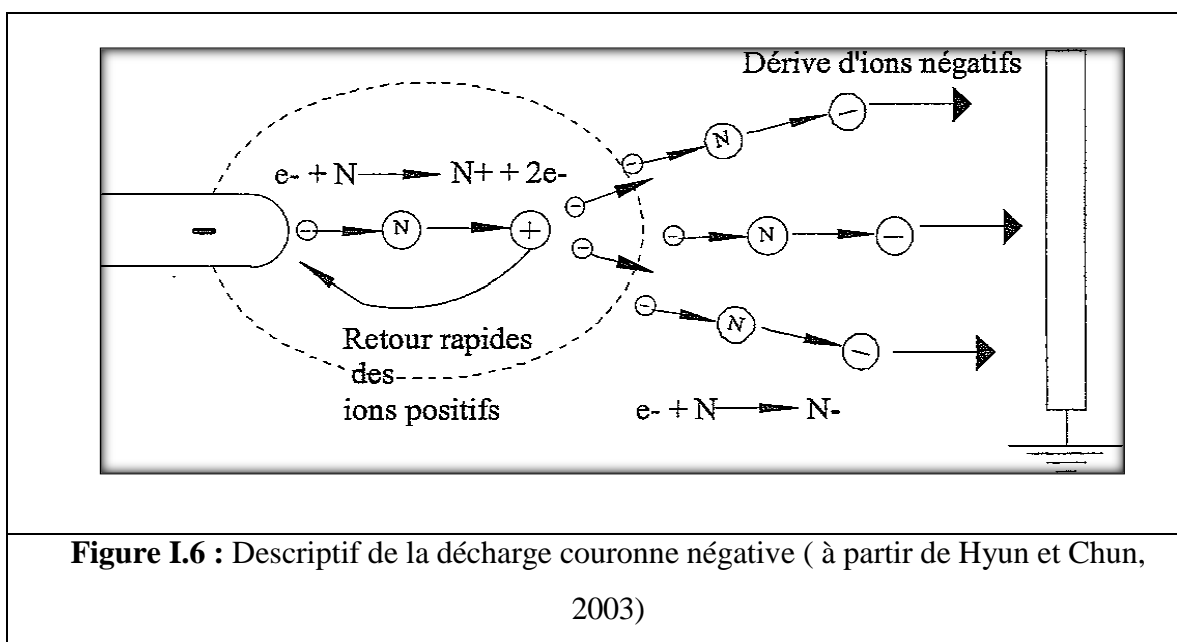
Dans le cas où le fil est porté à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de fil. Goldman et Sigmond [12], expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure I.5). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers l'électrode plane mise à la terre.



De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [13]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques.

### II.3.4 Stabilité du phénomène

Le fait que le phénomène soit stable explique la distinction entre la décharge couronne en polarité positive et négative. Selon Goldman et Sigmond (1982), les décharges couronnes se distinguent par l'existence d'une région de dérive des ions qui, dans la plupart des cas, joue le rôle d'une impédance en série avec la région d'ionisation, ce qui leur confère leur stabilité.



### **I.3.5 Apparence lumineuse**

Les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer. Dans la décharge positive, les ions sont directement créés dans la région d'ionisation et migrent dans tout l'espace inter-électrode. À partir de l'électrode active (pointe), un courant de particules négatives se propage vers l'électrode passive, atteignant une énergie de 1 à 100 eV. Avec une pointe, on obtient (dans l'air) une zone lumineuse en forme de champignon de couleur bleue violacée. Le spectre de l'azote et des composés oxygénés est responsable de cette couleur. Ce phénomène d'effluve négatif ne se manifeste qu'à une distance limitée du fil, ce qui exclut la formation d'un canal entre les électrodes. Il est possible de réduire leur distance sans qu'il y ait d'étincelle. Étant donné que l'étincelle émerge d'un fil positif, l'effluve négatif ne se retourne pas de lui-même vers l'étincelle. Il s'agit d'un phénomène stable qui se limite aux environs des fils [22].

### **I.3.6 Sources des électrons germes**

La formation d'une décharge électrique dans un espace gazeux soumis à un potentiel requiert la présence de charges libres dans l'environnement : les électrons germes. Ces électrons sont générés par divers mécanismes d'ionisation et sont essentiels pour de nombreux phénomènes physiques et applications technologiques.

#### **➤ Rayonnement cosmiques ou radioactivité naturelle**

Sous l'effet de l'irradiation par rayonnements cosmiques ou par les processus de radioactivité naturelle, 7 à 20 électrons par  $\text{cm}^3/\text{sec}$  sont produits dans l'air à la pression atmosphérique [14].

#### **➤ Détachement d'électrons des ions négatifs**

C'est le processus principal de production d'électrons à partir d'ions négatifs. Ces derniers peuvent préexister dans l'espace inter-électrodes, c'est le cas de la présence des impuretés telles que  $\text{O}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O}$  et les pourvoyeurs principaux en électrons germes seront les ions négatifs  $\text{O}_2-(\text{H}_2\text{O})_n$  ou  $\text{H}_2\text{O}-(\text{H}_2\text{O})_n$  liés aux impuretés [15], [16].

## ➤ Contribution de la cathode

Dans le cas d'une configuration pointe positive-plan négatif, la cathode est généralement une source d'électrons germes peu efficace, parce qu'elle est d'une part soumise à un champ électrique faible et d'autre part située à une distance importante de la zone de décharge.

### I.3.7 Collisions élastiques et inélastiques

Les particules chargées, soumises à un champ électrique et donc à la force de Coulomb, vont se heurter aux espèces chimiques environnantes. Les collisions élastiques sont donc séparées des collisions inélastiques. Dans les chocs élastiques, la structure interne des atomes reste inchangée, seule leur vitesse est augmentée. Dans l'ensemble, l'énergie cinétique du système demeure la même. En revanche, lors de chocs inélastiques, l'énergie interne des particules est modifiée. Dans cette situation, l'énergie de la particule incidente est adéquate pour que la particule heurtée atteigne un niveau excité supérieur ou soit ionisée. Ainsi, les chocs inélastiques sont responsables d'un grand nombre de réactions physico-chimiques qui vont entraîner des changements dans les propriétés macroscopiques du gaz. Les phénomènes ionisants sont alors différenciés :

**Excitation** : lorsque l'énergie d'un atome est suffisante pour qu'un des électrons atteigne un niveau d'énergie orbital plus élevé. L'état fondamental de l'atome se transforme en un état excité.

**Ionisation** : dans cette situation, l'atome absorbe assez d'énergie lors de la collision pour libérer un de ses électrons de l'attraction du noyau. Il est possible que l'électron soit lié à un autre atome (attachement) ou qu'il s'éloigne à l'infini. Ensuite, les processus dé-ionisants :

**La recombinaison** se produit lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent, soit un ion positif rencontre un électron, soit deux ions de signes contraires se rencontrent.

**Le phénomène du détachement** se produit lorsqu'un ion perd son électron supplémentaire.

### I.3.8 Décharge électriques dans les gaz

L'application d'une tension élevée entre deux électrodes dans un gaz peut entraîner l'ionisation du gaz, ce qui permet le passage d'un courant électrique. C'est un phénomène fréquemment observé dans des expériences sur les décharges électriques dans les gaz rares, qui ont abouti à des découvertes

scientifiques importantes telles que celle de l'électron et des rayons X [17]. Les diverses formes de décharges électriques ont des utilisations multiples et des conséquences significatives dans les secteurs de l'électrotechnique, de la physique des plasmas et de la recherche scientifique. Les décharges à **pression atmosphérique** comprennent les arcs et torches à plasmas, la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique [18].

## **I.4 Phénomènes dans les décharges à haute pression**

Depuis les années 1930, les groupes de Loeb aux États-Unis [4] et Raether en Allemagne [19] ont entrepris un important travail expérimental pour expliquer la formation et analyser les caractéristiques des décharges formées sous haute pression. Il était tout naturel que les premiers travaux conduits sur les décharges sous haute pression se situent dans la continuité des travaux de Townsend et concernent plus particulièrement des systèmes capacitifs à électrodes parallèles. Trois types de phénomènes et mécanismes liés à la formation des décharges à haute pression ont été mis en évidence par ces travaux expérimentaux :

- les avalanches,
- les décharges par avalanches successives,
- les ondes d'ionisation ou streamer.

## **I.5 Les avalanches**

Ce phénomène avait déjà été mis en évidence dans les décharges à basse pression par Townsend. Il s'agit de phénomènes couplés de dérive et de développement d'un électron germe dans un champ Laplacien. Le développement a lieu grâce à l'ionisation par impact d'électrons et à la diffusion radiale du nuage électronique en cours de formation. Au cours de son développement, une avalanche est caractérisée par sa taille géométrique, c'est-à-dire son diamètre en tête d'avalanche et le nombre d'ions qu'elle contient. Ces deux paramètres sont en fait couplés et ne dépendent pour un gaz donné que du temps écoulé depuis la naissance de l'électron germe à l'origine de l'avalanche et du champ électrique réduit  $E/N$  où  $E$  est le champ électrique (en  $V.cm^{-1}$ ) et  $N$  est le nombre d'électrons par unité de volume dans le gaz (en  $cm^{-3}$ ). Quel que soit le mécanisme de claquage à l'origine de la formation d'une décharge sous haute pression, c'est toujours l'initiation et le développement d'une avalanche qui constitue l'étape première du mécanisme [20].

### **I.4.2 Les décharges par avalanches successives**

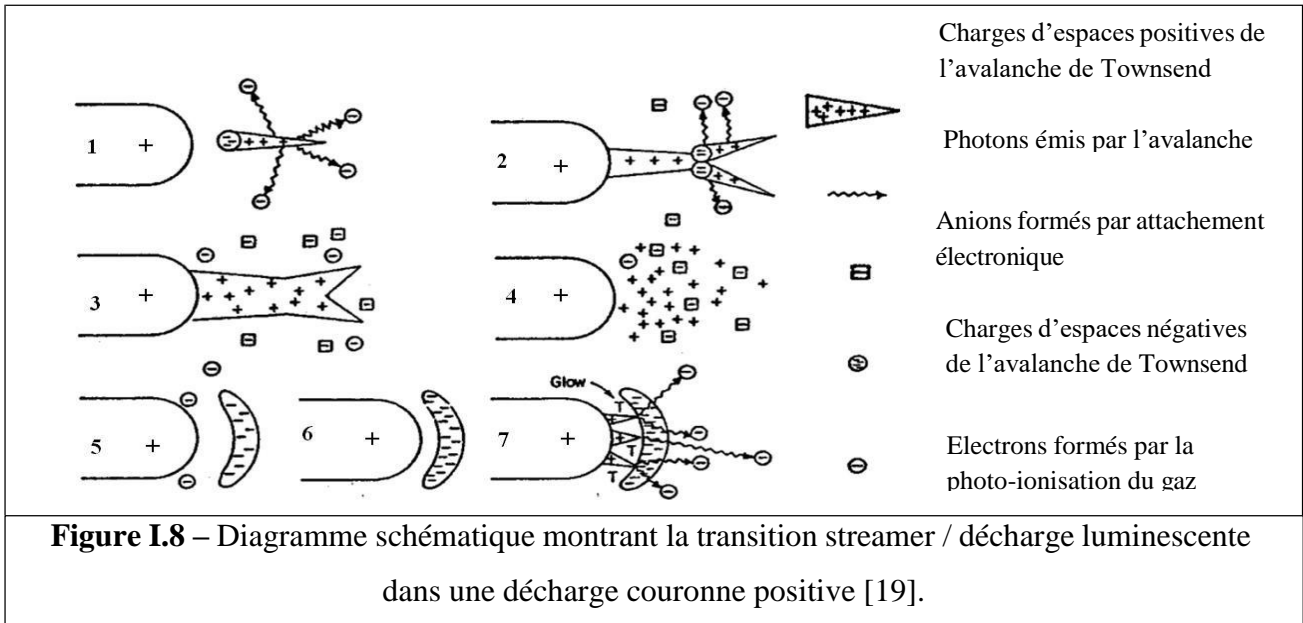
Ce mécanisme stipule que le claquage à haute pression peut avoir lieu grâce à l'établissement d'un champ électrique intense provenant d'une charge d'espace importante qui se construit à l'issue du passage de plusieurs avalanches successives. La grande différence de mobilité entre les électrons et les ions est implicitement exploitée ici. Il faut noter que ce mécanisme d'avalanches successives ne peut s'appliquer que dans le cas d'un champ Laplacien relativement important dans tout l'espace inter-électrodes, Bien que ce scénario ait été mis en évidence par Raether et par simulation numérique, il ne peut à lui seul expliquer toutes les situations de claquage.

### **I.4.3 Les ondes streamer**

À partir des observations sur les décharges couronnes fortement asymétriques se développant avant l'apparition de l'étincelle, il a été possible de proposer un autre mécanisme de claquage dans les décharges à haute pression. Le scénario de claquage stipule que la décharge commence d'abord par la formation d'une avalanche. La différence de mobilité entre les électrons et les ions va induire une charge d'espace qui grandit au fur et à mesure du développement de l'avalanche. Lorsque le nombre d'électrons devient de l'ordre de  $10^8$  à  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ , le champ positif de la charge d'espace associée devient plus important que le champ Laplacien et gouverne alors la dynamique de la décharge [4]. On obtient une onde d'ionisation qui se propage sous l'effet de son propre champ de charge d'espace. C'est cette onde d'ionisation qu'on appelle streamer. Comme la propagation d'un streamer ne dépend que de son propre champ de charge d'espace, elle peut a priori avoir lieu en direction de la cathode ou en direction de l'anode. Ceci permet de distinguer deux types de streamers

### **I.4.5 les streamers anodiques et les streamers cathodiques.**

Le scénario de propagation d'un streamer (figure I.8) stipule que si un photon émis par la décharge crée un électron entre le streamer et la cathode, il donne lieu à une petite avalanche qui se dirige vers la zone de charge d'espace positive en tête de streamer. Le champ dans cette région est si intense que l'avalanche se développe de manière conséquente au voisinage du streamer avant de le rejoindre et contribuer à sa propagation. Ramification et l'apport d'électrons directement en tête de streamer dans le cas des streamers cathodiques.



De par leur principe de fonctionnement, à haute pression ou à grande distance inter-électrodes (fort  $p \times d$ ), les décharges sont généralement constituées de micro-décharges qui n'ionisent pas uniformément le volume du gaz et durent très peu de temps. À l'origine de chaque micro-décharge, il y a un électron, qui crée une avalanche électronique suffisante pour que les ions forment une charge d'espace qui localise le champ électrique, induisant un streamer anodique dont la propagation est liée aux électrons d'un streamer cathodique, dont le développement est lié aux photons émis par la micro-décharge. Ces photons créent des électrons par photo-ionisation ou photo-émission dans la zone de champ fort, c'est-à-dire entre la zone de charge d'espace (tête de streamer) et la cathode. Ces électrons font à leur tour des avalanches dites secondaires dont les électrons neutralisent la charge d'espace positive due à l'avalanche primaire et laissent derrière eux une nouvelle charge d'espace positive plus près de la cathode. Lorsque le streamer atteint la cathode, les électrodes se trouvent en contact électrostatique à travers la micro-décharge générée par le streamer et située derrière celui-ci. Comme le corps de la micro-décharge est « ambipolaire », l'essentiel de la variation du potentiel entre la cathode et l'anode se situe dans une zone de dimension réduite au point de contact entre la micro-décharge et la cathode. Le champ électrique à cet endroit devient très intense et induit une ionisation très importante et l'extraction d'un important flux d'électrons de la cathode. Ce flux d'électrons est à l'origine d'une nouvelle onde d'ionisation qui se propage de la cathode vers l'anode afin d'équilibrer le potentiel entre les deux électrodes. Cette onde souvent désignée par le terme anglais « return stroke » transforme la micro-décharge en une décharge lumineuse transitoire anormale. Dans cette décharge ont lieu des phénomènes d'ionisation qui conduisent à une augmentation de la densité d'électrons et un échauffement du gaz.

### I.4.4 Théorie de Townsend

La théorie de Townsend [15] [23] est basée sur la multiplication des électrons par ionisation du gaz inter électrodes. L'air contient toujours des électrons libres, le champ électrique les accélère et quand ils atteignent une énergie suffisante (10 à 25 eV, selon la nature du gaz) ils entrent en collision avec les molécules de l'air. Chacun de ces électrons peut arracher un électron à une molécule ou à un atome du gaz et reprendre sa course. L'électron arraché est, à son tour, accéléré comme les électrons initiaux, et peut lui aussi arracher un autre électron et le processus évolue en une avalanche d'électrons (figure 1.9).

L'avalanche électrique se manifeste par une décharge dite “**non autonome**” puisque cette décharge n'existe qu'en présence d'un agent ionisant (dans ce cas le champ électrique). Donc sur un déplacement  $dx$  en direction du champ électrique  $E$ , un électron crée  $\alpha \cdot dx$  électrons.  $\alpha$  est appelé “**premier coefficient de Townsend**”, il désigne le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron effectue par unité de longueur dans la direction du champ. L'unité de  $\alpha$  est  $cm^{-1}$ .

Si  $n_0$  est le nombre d'électrons initialement existant dans un gaz, à la distance  $x$ , le nombre d'électrons créés par avalanche est :

$$\mathbf{n}(\mathbf{x}) = \mathbf{n}_0 e^{\alpha x} \quad (2.1)$$

La densité du courant initiale étant  $j_0$ , par avalanche ce courant devient :

$$\mathbf{j}(\mathbf{x}) = \mathbf{j}_0 e^{\alpha x} \quad (2.2)$$

$\alpha$  dépend de la nature du gaz, du champ électrique et de la pression.

Townsend a proposé une expression analytique de la dépendance simultanée de la pression et du champ électrique qui est la suivante:

$$\frac{\alpha}{P} = A \cdot \exp(-B \cdot P/E) \quad (2.3)$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes du gaz.

Pour des valeurs élevées de  $E/P$ , interviennent un certain nombre d'effets secondaires comme la charge d'espace et l'émission secondaire. De tous ces effets, c'est l'émission cathodique qui

prédomine. Townsend a introduit un coefficient qui caractérise le nombre d'électrons émis par la cathode par ion incident. Ce coefficient dépend aussi de la pression et du champ électrique.

La densité de courant d'avalanche s'écrit alors :

$$j = j_0 \exp(\alpha x) / [1 - \gamma [\exp(\alpha x) - 1]] \quad (2.4)$$

Lorsque la tension continue d'augmenter, elle atteint une valeur dite "tension disruptive" qui engendre une augmentation rapide du courant. On arrive à une situation telle que dans l'expression (2.4),  $\gamma [e^{\alpha x} - 1]$  tend vers l'unité.

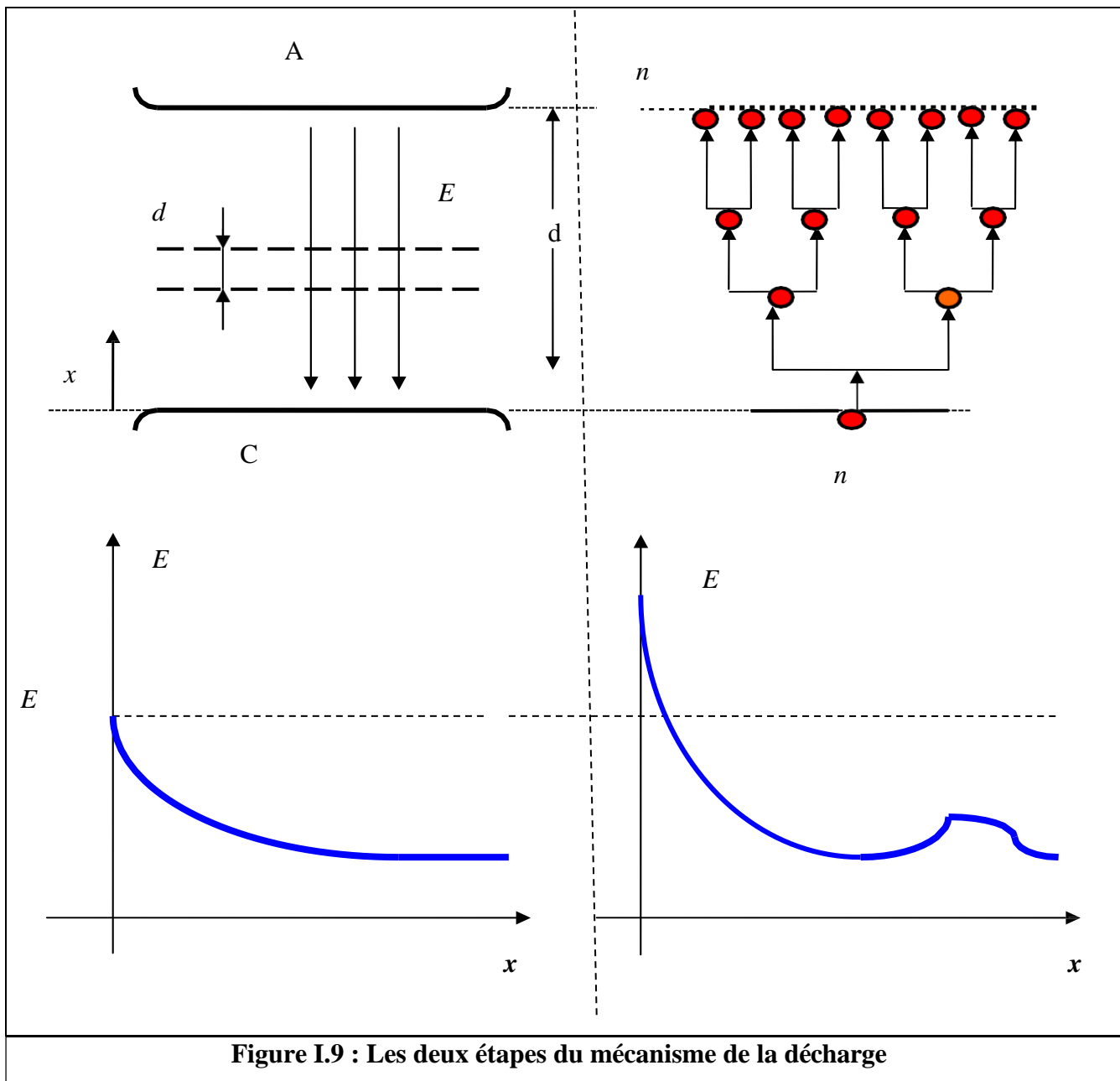


Figure I.9 : Les deux étapes du mécanisme de la décharge

La décharge se produit dans un champ non homogène, au-delà de l'étroite région d'ionisation, le champ électrique diminue ce qui provoque la diminution de l'énergie des électrons et leur capture par les atomes d'oxygène. L'oxygène est un gaz électronégatif où le phénomène d'attachement est prépondérant, donnant naissance à des ions négatifs. Ces ions sont beaucoup moins mobiles que les électrons, ils constituent la charge d'espace entre la région d'ionisation et les plans. Ceci ralentit le passage de courant et stabilise le phénomène et permet d'atteindre sans claquage des tensions plus élevées [24]. La théorie de Townsend fait intervenir tout l'intervalle inter électrodes. Elle prévoit à des pressions élevées, des temps de transition des charges beaucoup plus grands que le temps de la formation de la décharge. Ceci permet d'écarter le processus secondaire « $\gamma$ » car les ions positifs sont freinés et leur énergie cinétique n'est plus suffisante pour extraire des électrons supplémentaires de la surface cathodiques.

A partir des années 40, les travaux menés par Loeb et Meek à Berkeley (Université de Californie) et par Raether en Allemagne mettent en évidence des divergences entre la théorie et les résultats expérimentaux à la pression atmosphérique [25]. Le modèle de Townsend présente cependant des limites lorsqu'on cherche à l'appliquer à de plus fortes valeurs du produit  $P.d$  (>200 torr.cm). Ces travaux confirment la non validité de la théorie de Townsend pour les pressions élevées de gaz, en champ uniforme. Cependant, cette théorie conserve sa validité pour des valeurs de produit  $P.d$  inférieure à 200 torr .cm.

### **I.4.5 La loi de Paschen**

La loi de Paschen, énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 1889, à partir de mesures effectuées dans l'air, l'hydrogène et le gaz carbonique, décrit la tension de décharge qui varie avec la pression du gaz et la distance ' $d$ ' entre les deux électrodes. La loi s'applique uniquement dans le cas d'un champ électrique uniforme entre les deux électrodes.

Dans ce cas  $E = V / d$ . En utilisant le phénomène de décharge de Townsend nous avons :

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{10} e^{ad}}{\mathbf{1} - \gamma(e^{ad} - \mathbf{1})} \quad \mathbf{(2.5)}$$

La courbe typique de Paschen pour l'air est montrée sur la figure (1.10). Le minimum de Paschen pour l'air est 327 V ayant lieu à  $Pd = 0.756 \text{ Pa.m}$ . La loi de Paschen n'est valable que pour une température constante. Il y a décharge lorsque le dénominateur tend vers 0. Cela implique que :

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \Leftrightarrow e^{ad} = \frac{1}{\gamma} + 1 \Leftrightarrow ad = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (2.6)$$

Nous pouvons déterminer  $\alpha$  de manière expérimentale :

$$a = P \cdot A_i \cdot \exp\left(\frac{-B_i \cdot P}{E}\right) \quad (2.7)$$

où  $P$  est la pression du gaz,  $A_i$  et  $B_i$  sont des constantes connues et  $i$  indique le type de gaz présent.

En remplaçant la valeur de  $\alpha$  dans (2.6) on obtient :

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = P \cdot d \cdot A_i \cdot \exp\left(\frac{-B_i \cdot P}{E}\right) \Leftrightarrow \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(P \cdot d \cdot A_i) - \frac{B_i \cdot P \cdot d}{V} \quad (2.8)$$

En isolant  $V$  et en appelant  $V_d$  la tension de décharge et en considérant  $\gamma = \gamma_j$  le coefficient d'ionisation secondaire de Townsend pour un métal  $j$ . nous avons alors l'expression de  $V_d$  en fonction du produit  $(P \cdot d)$  [26- 27] :

$$V_d = \frac{B_i \cdot P \cdot d}{\ln(P \cdot d \cdot A_i)} - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma_j} + 1\right)\right) \quad (2.9)$$

À la pression atmosphérique au niveau de la mer, l'air est un isolant disposant d'une tension de claquage élevée. Il n'y a pas assez d'électrons libres et leur libre parcours moyen est trop faible pour qu'ils acquièrent une accélération suffisante entre deux collisions successives : leur énergie cinétique est insuffisante pour ioniser le gaz. Mais plus la pression de l'air diminue, plus le libre parcours moyen augmente. L'énergie cinétique des électrons augmente ainsi et la décharge électrique survient à des tensions faibles et évolue vers le minimum de Paschen. Si la pression continue de décroître sous ce minimum alors la tension à fournir doit augmenter à nouveau en raison du libre parcours moyen des électrons qui devient trop grand : il n'y a plus assez d'atomes à ioniser sur leur chemin [28].

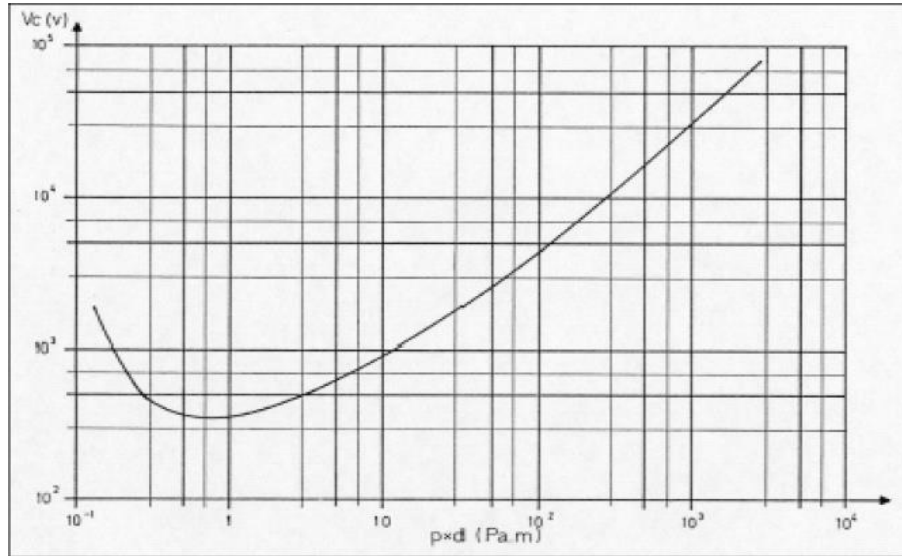


Figure I.10 : Courbe de Paschen pour l'air à 20 °C

### I.5 Notion du vent électrique

Le vent électrique résulte d'un transfert de quantité de mouvement entre les particules chargées et les particules neutres du gaz, les particules chargées étant mises en mouvement par les forces de Coulomb (champ électrique). Cette définition fournie par Faraday en 1838, complète celle donnée par Tiberius Cavallo en 1777. En 1961, Robinson [29] a établi pour la première fois une relation liant la vitesse du vent électrique au courant moyen de décharge, dans des champs électriques unidimensionnels. Son expression est :

$$v = \sqrt{\left(\frac{I}{\rho \cdot \mu}\right)} \quad (2.10)$$

Avec,  $v$  la vitesse du vent en  $m \cdot s^{-1}$ ,  $I$  le courant moyen de décharge,  $A$  la constante dépendant principalement de la géométrie des électrodes,  $\rho$  la masse volumique du gaz et  $\mu$  la mobilité moyenne des ions.

Cette expression montre que la vitesse du vent électrique varie avec la racine carrée du courant moyen de décharge. Il est par ailleurs important de différencier la vitesse  $v$  du gaz, donnée par cette relation expérimentale, de la vitesse  $v_i$  des ions contenus dans le gaz, qui s'exprime :  $v_i = \mu \cdot E$  ( $E$  est

le champ électrique). En effet, la vitesse du vent électrique dans l'air est de l'ordre de quelques m/s (sans écoulement extérieur), tandis que la vitesse des ions elle, peut varier de plusieurs milliers de m/s dans la zone d'ionisation à quelques dizaines de m/s dans la zone de dérive. Selon la théorie, c'est une force appelée force Electro Hydro Dynamique (EHD) qui est à l'origine du vent électrique. Elle est considérée comme étant égale à la perte de quantité de mouvement des particules chargées dans un volume donné. L'expression finale de la force EHD totale par unité de volume est :

$$f_{EHD} = e (n_p - n_e - n_n) E - [\nabla (n_p k T_p) + \nabla (n_e k T_e) + \nabla (n_n k T_n)] \quad (2.11)$$

où  $E$  est le champ électrique et  $n_p, n_e, n_n$  sont les densités des particules chargées.

Selon cette équation, on voit clairement que la force EHD est non nulle uniquement dans les zones non neutres. En effet, dans les zones neutres où le plasma est électriquement neutre, il y a autant d'espèces négatives que positives, les gradients sont nuls, donc la force EHD est nulle. Par contre, dans une région non neutre, il existe une force volumique qui va mettre le fluide en mouvement. C'est souvent le cas dans les régions unipolaires comme par exemple, la zone de dérive des ions dans une décharge couronne créant ainsi le vent électrique.

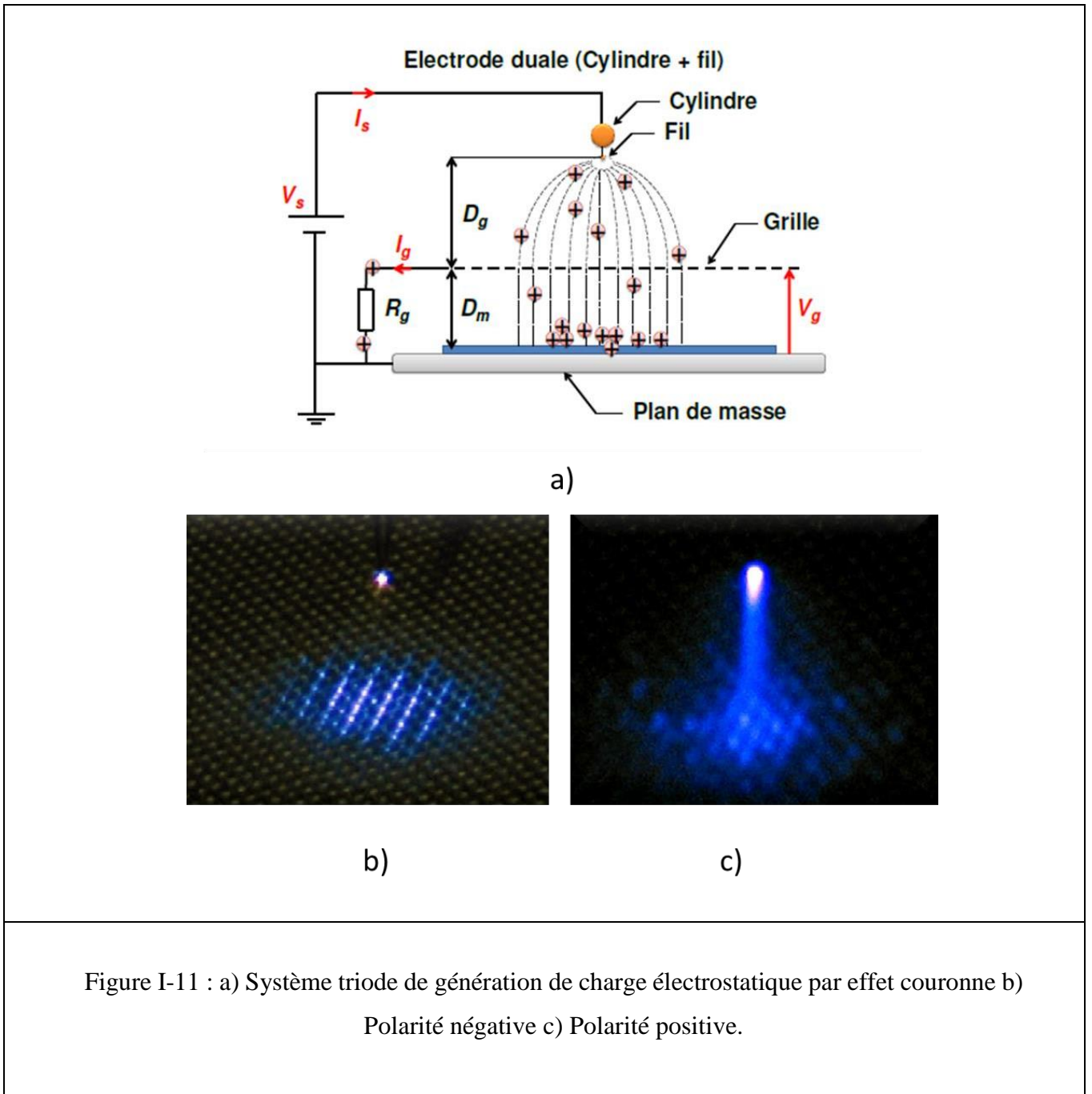
## **I.6 Applications de la décharge couronne dans le domaine industriel**

La décharge couronne trouve de nombreuses applications dans l'industrie, dans la médecine et dans la vie quotidienne. Ainsi, elle est utilisée dans les précipitateurs électrostatiques, dans les séparateurs électrostatiques des matériaux granulaires, dans les équipements d'électro-photographie et d'impression électro-graphique, dans les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs, dans les dispositifs de chargement par effet couronne des matériaux non-tissés utilisés comme des médias filtrants [44] :

### **➤ Génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères par effet couronne :**

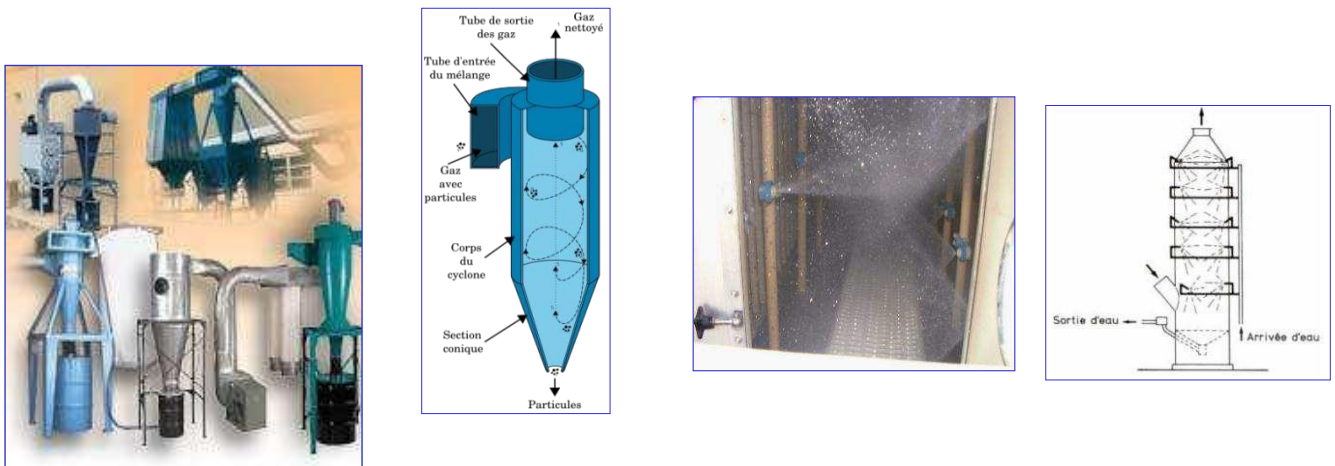
Des systèmes ont été conçus pour diriger et contrôler le niveau de charge générée. Le système d'électrodes montré sur la figure I-4 est le plus utilisé pour la charge des médias fibreux. La décharge couronne sera utilisée pour le chargement des polymères plaques en vue des études sur l'effet de la

charge électrostatique sur les conditions de frottement. La décharge couronne sera utilisée pour le chargement des polymères plaques en vue des études sur l'effet de la charge électrostatique sur les conditions de frottement. Le mode de fonctionnement du système d'électrodes de type « triode », qui sera utilisé dans cette étude, a déjà été bien caractérisé par Tabti (2011) [43] et Fatihou (2016) [44] (figure I-4, a).



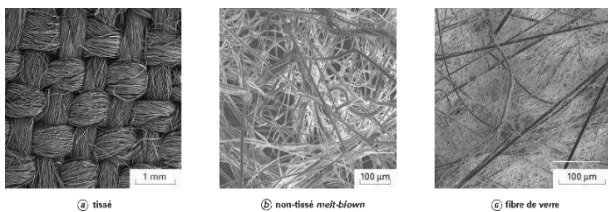
### I.6.1 Les précipitateurs électrostatiques

Le filtre électrostatique est un dispositif dans lequel les forces électrostatiques piègent les particules contenues dans un gaz. Il est constitué d'un ensemble d'électrodes actives et d'électrodes de collecte et peut être de géométrie plane ou cylindrique. La décharge générée au sein de ce dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions, par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Lors de collisions de ces ions avec des articles, ces dernières se chargent, puis elles se dirigent vers les électrodes de collecte suivant la direction de champ électrique. Ce processus est appelé la précipitation électrostatique [40] [41] [38].



a) Filtres mécaniques

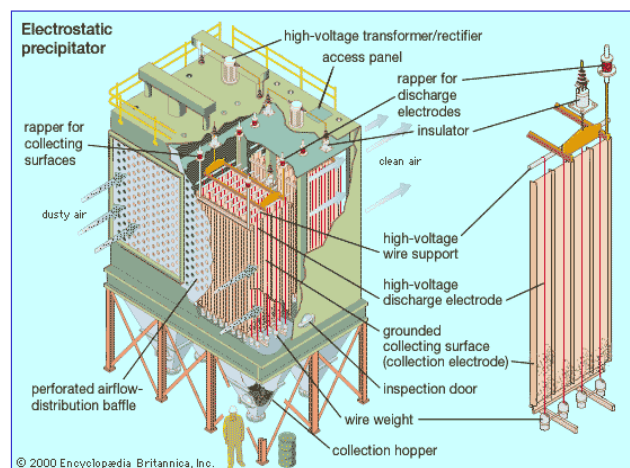
(b) Filtres hydraulique



Ⓒ tissé Ⓓ non-tissé melt-blown Ⓔ fibre de verre



(c) Filtres à couche filtrante



(d) Filtres électriques ou électrofiltres

**Figure I.12.** Exemples de dispositifs industriels de filtration de l'air [37]

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrofiltre, prenons l'exemple d'un précipitateur électrostatique industriel de géométrie cylindrique (Figure I.14). Il est constitué d'un cylindre métallique disposé verticalement (l'électrode de collecte) et d'un fil suspendu le long de l'axe central du cylindre (l'électrode active). L'électrode active est reliée à la haute tension continue tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse.

Lorsqu'on applique une tension au-delà d'un seuil (tension d'allumage de la décharge), une décharge couronne apparaît autour du fil. Elle apparaît soit sous la forme de spots lumineux (tension DC négative) répartis le long du fil et appelés « *Tufts* » ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » (tension DC positive). Les phénomènes lumineux représentent localement les régions ionisées du gaz à partir desquelles des ions de même polarité que l'électrode active sont émis vers l'électrode de collecte. Ces ions traversent l'espace inter-électrodes sous l'action d'un champ électrique continu, en direction de l'électrode de collecte. Lorsqu'on introduit des gaz pollués par la partie basse de l'électrofiltre, ils traversent l'espace inter-électrodes en montant. Les particules qu'ils contiennent captent au passage des ions et se chargent fortement ; elles sont alors soumises à la force de Coulomb qui les dirige vers la surface interne de l'électrofiltre où elles se déposent [40] [41] [38].

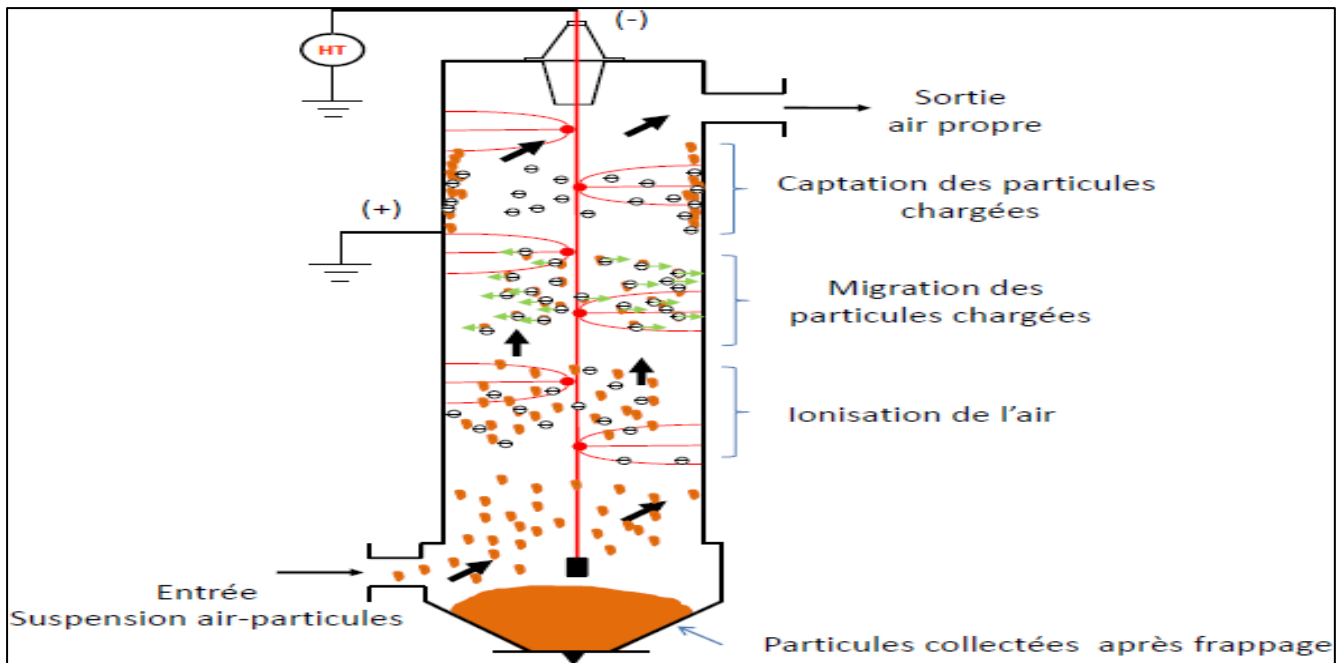


Figure I.13. Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [39]

Les gaz sortent donc dépollués par la partie haute de l'électrofiltre tandis que les particules piégées s'accumulent sur sa surface interne en formant une couche de poussière. Par un procédé mécanique qui consiste à frapper les parois de l'électrofiltre à l'aide d'un marteau, on fait tomber les poussières dans le fond de l'électrofiltre où un dispositif prévu à cet effet permet de les évacuer. On peut distinguer trois types des électrofiltres industriels : les électrofiltres à un seul étage, les électrofiltres à deux étages et les électrofiltres humides. Dans les électrofiltres à un seul étage, la charge et le piégeage des particules sont réalisés simultanément sur toute la longueur du filtre. Dans les électrofiltres à deux étages, le premier étage constitue le module d'ionisation composé d'électrodes en forme de tube ou de fil. Le second étage, ou le module de collecte, est constitué d'une alternance de plaques, les unes sont portées à un fort potentiel et les autres sont reliées à la terre. Finalement, les électrofiltres humides utilisent un film d'eau pour nettoyer le dépôt sur les surfaces des électrodes de collecte [39].

### **I.6.2 Séparateurs électrostatiques industriels**

Il existe une multitude de séparateurs avec différentes techniques, nous citerons le séparateur électrostatique à tambour, comme celui montré sur la figure (1.15), est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Son principe de fonctionnement consiste à la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro-transporteur (2) sur le cylindre tournant (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

Electrode couronne reliée à une source de haute tension (HT) ;

Electrode statique reliée à la même source de HT ;

Goulotte oscillante

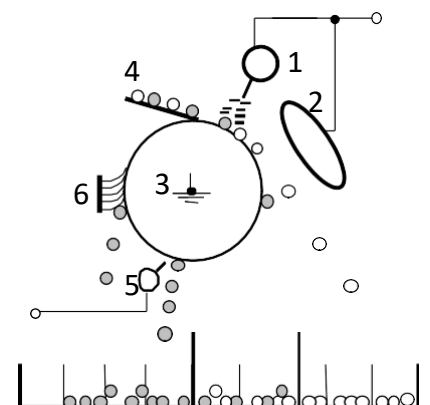
Electrode cylindrique reliée à la terre ;

Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ;

Brosse ;

: Particules isolantes

o : Particules conductrices.



**Figure 1.14.** Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [42].

Les granules isolants adhérents à la surface du tambour grâce à une force d'image électrique et finissent par tomber dans la partie gauche du collecteur, tandis que les granules conducteurs perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre. En arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (5), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposée au potentiel HT [42]. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur (6).

### I.6.3 Les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs

Les DBDs concilient une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation pour la production d'ozone. L'oxygène est piégé entre les électrodes à haute tension qui simulent la décharge (figure .12).

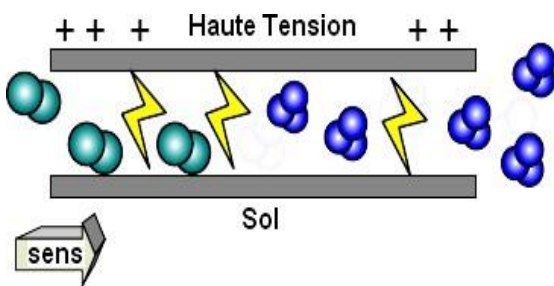


Fig.12 : Production d'ozone par DBD

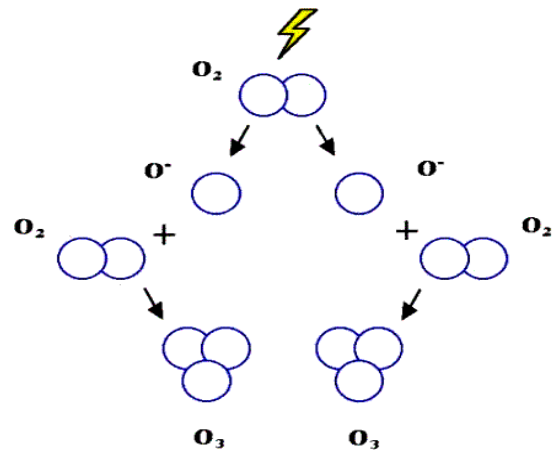


Fig.13 : Processus de formation

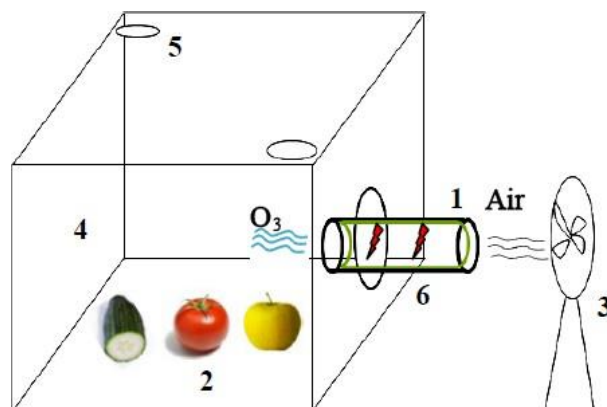


Figure I.15 : Schéma descriptif du procédé de traitement

Cette décharge électrique (une étincelle) scinde une molécule d'oxygène en deux atomes d'oxygène. Ces 2 atomes d'oxygène instables combinent avec d'autres molécules d'oxygène pour former l'ozone (figure.13) [45-46].

L'ozone généré par le réacteur DBD permettra un traitement efficace de l'air et une conservation optimale des produits agro-alimentaires, la production de l'ozone par réacteur DBD est un moyen efficace pour la désinfection de l'air ainsi une solution adéquate pour le domaine agro-alimentaire [47]

### **I.7 Modèle mathématique de la décharge couronne pour les PES**

L'utilisation d'un tel modèle peut fournir une assistance dans la compréhension physique des mécanismes de décharge dans l'air et permet de prédire des valeurs utiles à la conception et au dimensionnement des isolations. Vu la complexité du phénomène, beaucoup de chercheurs se sont intéressés à modéliser plutôt des phases de décharge. L'avantage de ce point de vue est qu'il peut offrir un modèle d'initiation et de propagation suffisamment « sophistiqué » pour être sensible à la configuration géométrique et à la contrainte appliquée.

Les modèles jusqu'ici développés ont été soit basés sur la loi empirique de Peek généralisée [48] soit sur l'intégration numérique de l'équation régissant l'avalanche numérique de Townsend [49,50]. En champ non-uniforme, ils définissent la tension seuil d'apparition de l'effet couronne. En utilisant l'équation donnée par Cooperman [51], on peut déterminer le champ seuil  $E_S$  de la décharge couronne à la surface de la nappe, où le système nappe de fils-deux plans (Figure **I.17**) est équivalent à un système cylindrique coaxiale (fil-cylindre) :

$$E_S = \frac{U_s}{r_0 \ln(R/r_0)} \text{ (KV/cm)} \quad \text{(I.9)}$$

$$\text{Pour } \frac{a}{d} \geq 0.2 \text{ alors } R = \frac{a}{2\pi} \exp\left(\frac{\pi d}{a}\right) \quad \text{(I.10)}$$

$$\text{Pour } \frac{a}{d} \leq 0.6 \text{ alors } R = \frac{4d}{a} \quad \text{(I.11)}$$

Où  $U_s$  est la tension seuil de l'effet couronne ;

$R$  : le rayon du cylindre équivalent ;

$r_0$  : le rayon du fil ;

$a$  : la moitié d'espace entre deux fils voisins ;

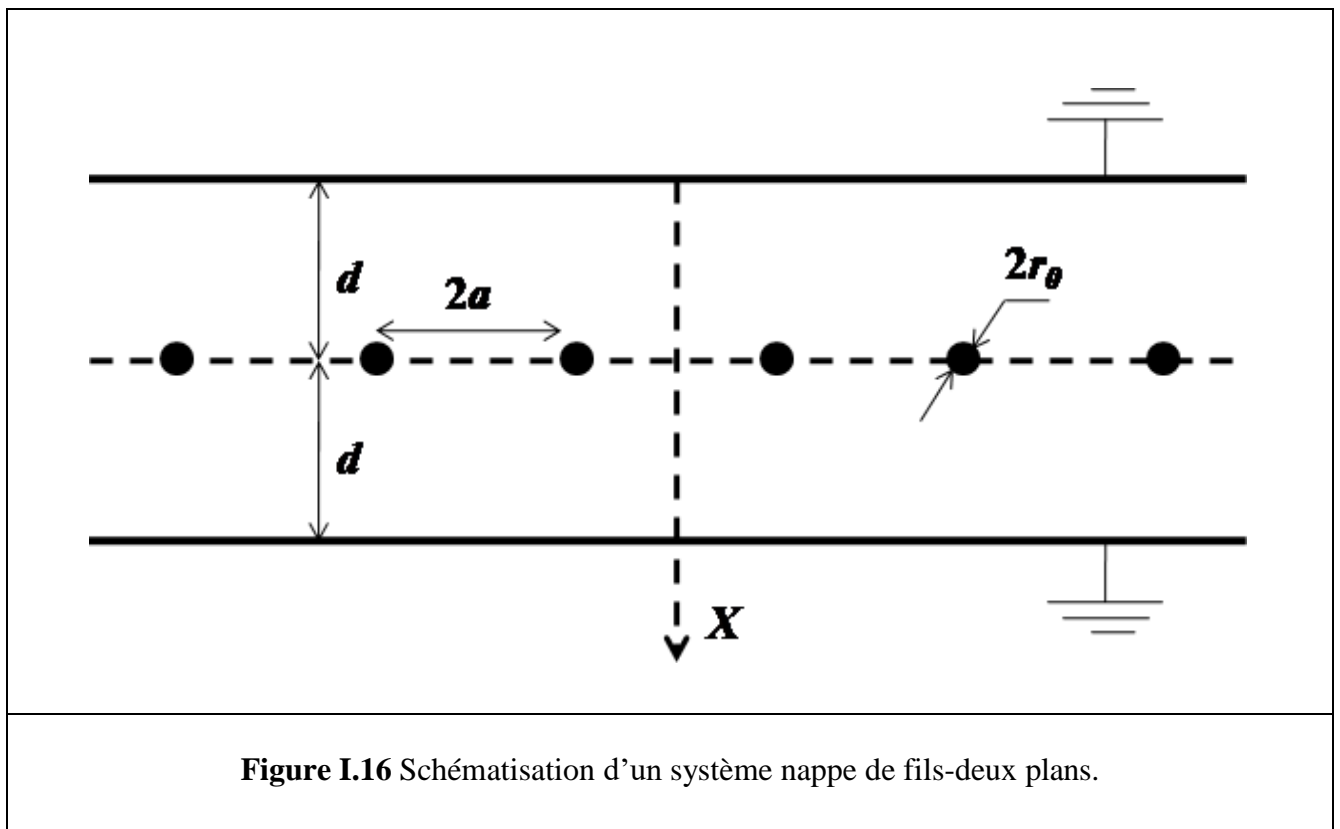
$d$  : distance nappe de fils-plan

Pour un nombre important de fils de la nappe, la tension  $U_s$  et le champ seuil  $E_s$  deviennent indépendant de nombre de fils de la nappe. A une distance  $X_c$  de la surface de la nappe, le champ électrique est égal au champ critique du minimum d'ionisation  $E_c$  donné par :

$$E_c = \frac{U_s}{(r_0 + X_c) \cdot \log(R/r_0)} \quad (\text{I.12})$$

La longueur critique d'avalanche est égale à :

$$X_c = \left( \frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \cdot r_0 \quad (\text{KV/cm}) \quad (\text{I.13})$$



Le champ électrique au plan est constant, tout comme si les charges étaient uniformément réparties sur les plans. En se rapprochant de la nappe de fils, le champ commence à dévier champ uniforme [57].

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les phénomènes liés aux décharges électriques. L'étude de ces décharges dans des intervalles d'air présente un intérêt d'un point de vue technologique. Cette étude des mécanismes de la décharge électrique a montré que le phénomène était d'une très grande complexité. Malgré les grandes avancées effectuées dans les applications, beaucoup de processus physiques fondamentaux sont toujours sujets à des investigations. Les mécanismes de développement de l'avalanche électronique et de propagation des décharges ont été décrits. Les électrons accélérés par le champ électrique entrent en collision avec les molécules neutres présentes dans l'espace inter électrodes et conduisent à l'excitation et à l'ionisation du gaz.

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques. En effet, lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique, qui constitue le facteur clé dans l'ionisation des espèces neutres présentes dans le gaz. Les phénomènes d'ionisation et d'attachement se sont révélés être d'intérêt particulier car étant les principaux phénomènes contrôlant la décharge. Donc l'étude des phénomènes physiques fondamentaux de la décharge couronne nous permet de définir les paramètres essentiels influençant la décharge tel que l'air environnant le conducteur, le diamètre de conducteur, la tension appliquée, la distance entre les électrodes, ... etc.

Le prochain chapitre se concentre sur l'analyse bibliographique des précipitateurs électrostatiques en général, afin de mieux comprendre les différentes configurations géométriques des précipitateurs électrostatiques, ce qui a un impact significatif sur le rendement de collecte des particules qui seront ensuite étudiées dans cette étude.

- [1] H. Ait Said, “Influence de l’humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d’aérosols”, Thèse de doctorat, Université de Béjaïa, Algérie, 2016.
- [2] C. Gary, Effet couronne sur les réseaux électriques aériens. Techniques de l’Ingénieur, D4440, 1998.
- [3] F. W. Peek, “Dielectric phenomena in high voltage engineering,” 1920.
- [4] L. B. Loeb, Electrical coronas, their basic physical mechanisms. Univ of California Press, 1965.
- [5] L. Parissi, “Etude d’un procédé de traitement d’air chargé en composés organiques volatils par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique: mécanismes mis en oeuvre et recherche d’optimisation.” Thèse de doctorat, université Paris 6, France, 1999.
- [6] G. Hartmann, “Spectrographie de la décharge couronne: étude des mécanismes de collisions dans le dard,” Thèse de doctorat, Université Paris XI, France, 1977.
- [7] D. Lacoste, D. Pai, and C. Laux, “Ion Wind Effects in A Positive DC Corona Discharge in Atmospheric Pressure Air,” 42<sup>nd</sup> AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib., January, 2004.
- [8] A. Lacoste, D. Pai, C. Laux, Ion wind effect in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air, AIAA Reno., (2004), pp. 354.
- [9] J.F. Loiseau, J. Batina, F. Noël, R. Peyrous, Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 35 (2002) pp. 1020-1031.
- [10] M. Goldman, A. Goldman and R. S. Sigmond, The corona discharge, its properties and specific uses, Pure & Appl. Chem., 57 (1985) 1353–1362.
- [11] Q. Lancereau, J. M. Roux, J. L. Achard, Influence of secondary flows on the collection efficiency of a cylindrical electrostatic precipitator, J. Aerosol Science, 63 (2013) pp. 146 – 160
- [12] S. P. Fisenko, W. N. Wang, M. Shimada, K. Okuyama, Vapor condensation on nanoparticles in the mixer of a particle size magnifier, Inter. J. Heat and Mass Transfer, 50 (2007) pp. 2333 – 2338.
- [13] Salthouse E.C., Blackett J., Ryan H.M., 1876, I.C.G.D.A., Swansea (UK), pp. 224 – 226.
- [14] A. C. Lahjomri, P. Atten, Simulation EHD des précipitateurs électrostatiques, Revue Physique applied, 22 (1987) pp. 1087–1094.
- [15] M. Townsend, Electricity in Gases. Oxford University Press, (1915) 375 – 376.
- [16] B. L. Henson, A space-charge region model for microscopic steady coronas from

- points, *Journal Applied Physique*, 52 (1981) pp. 709 – 15.
- [17] T. Y. Wen, H. C. Wang , I. Krichtafovitch , A. V. Mamishev ,Novel electrodes of an electrostatic precipitator for air filtration, *Journal of Electrostatics* 73 (2015) pp.117 – 124.
- [18] N. Zouzou\_, E. Moreau, G. Touchard, Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan, *Journal of Electrostatics* 64 (2006) 537–542
- [19] H. Raether. *Electron avalanches and breakdown in gases*. Butterworths, London, 1964.
- [20] P. Cooperman, A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities, *Trans. Amer. Inst. Elec. Eng. Part 1*, 79 (1960) 47 – 50.
- [21] Schütze A. et al. (1998) The atmospheric-pressure jet : a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Trans. Plasma Sc.*, Vol. 26, No. 6, pp. 1685-1694.
- [22] Zimmer H.H., Schwab A.J., 1985, I.C.G.D.A., Oxford (UK), pp. 153 – 156.
- [23] Townsend J.M. (1948) *Electron in gases*. Hutchinson, London.
- [24] Segur P. (2005) *Gaz isolants. Techniques de l'ingénieur*, D2530-1 –D2531-22.
- [25] Meek J.M.(1940) A theory of spark discharge. *Physical Review*, Vol. 57, pp 722-728,
- [26] Loeb L.B. (1939) *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases*. John Wiley and Sons.
- [27] Jarrige J. (2008) *Etude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles nanoseconde à pression atmosphérique. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface*. Thèse de doctorat, de l'université de Rouen, France.
- [28] Oussalah N. (2008) *Détection et analyse des décharges partielles dans le câble de transport de l'énergie électrique*. Thèse de Doctorat de l'université de Bejaia, Algérie.
- [29] M. Robinson, "Movement of air in the electric wind of the corona discharge", *AIEE Trans. Journal*, 80:143–150, 1961.
- [30] J. Podlinski, A. Niewulis, J. Mizeraczyk, and P. Atten, "ESP performance for various dust densities," *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 246-253, 2008.
- [31] J. Miller and A. J. Schwab, "Electrical similarity concerning particle transport in electrostatic precipitator," *Journal of Electrostatics*, vol. 29, pp. 147–168, 1992.
- [32] J. Podlinski, J. Dekowski, M. Kocik, J. Mizeraczyk, and J. S. Chang, "Measurement of the flow velocity field in multi-field wire-plate electrostatic precipitator," *Czechoslovak Journal of Physics*, vol. 54, no. S3, pp. C922-C930, 2004.
- [33] J.S. Chang et al., "On-set of EHD turbulence for cylinder in cross flow under corona discharges," *Journal of Electrostatics*, vol. 64, pp. 567-573, 2006.
- [34] Y. N. Chun, J. S. Chang, A. A. Berezin, and J. Mizeraczyk, "Numerical modeling of near corona wire electrohydrodynamic flow in a wire plate electrostatic precipitator," *IEEE*

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 1, pp. 119–124, 2007.

- [35] J. Podlinski, J. Dekowski, J. Mizeraczyk, D. Brocilo, and J.-Sh. Chang, "Electrohydrodynamic gas flow in a positive polarity wire-plate electrostatic precipitator and the related dust particle collection efficiency," *Journal of Electrostatics*, vol. 64, no. 3, pp. 259–262, 2006.
- [36] J. Mizeraczyk et al., "Image of Electrohydrodynamic flow velocity field in a DC positive polarity needle-to-plate non thermal plasma reactor," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, no. 1, pp. 164–165, 2002.
- [37] R. Gouri, *Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré - application aux particules submicroniques*. Poitiers, France: Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [38] K. R. Parker, *Electrostatic precipitation*. London: Chapman & Hall, 1997.
- [39] J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [40] H. J. White, *Industrial Electrostatic Precipitation*. Massachusetts: Wesley Publishing Company, 1963.
- [41] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, pp. 615–624, 2000.
- [42] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials," *J. Electrostat.*, vol. 69, no. 6, pp. 631–637, 2011.
- [43] B. Tabti, *Thèse, Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface*, Université de Poitiers, 2011.
- [44] A. Fatihou, *Thèse, Amélioration des performances des matériaux fibreux non-tissés chargés par décharge couronne utilisés pour la filtration de l'air*, Université de Poitiers, 2016.
- [45] Nicolas Dubus « Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique » Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Novembre 2009.
- [46] OzoneGeneratorSystems, « Operating Instructions ». [Uwww.idswater.com/water/us/pacific\\_ozone\\_technology](http://www.idswater.com/water/us/pacific_ozone_technology). *U Phys.*, 38(4), pp 547- 554 (2005).
- [47] Yassine BELLEBNA, Karima AGAB, Amar TILMATINE "Étude expérimentale sur la génération d'ozone pour le traitement de l'air". *Acta Electrotehnica*, Volume 55, Number 1-2, 2014.
- [48] F.W. Peek, 1929, « Dielectric phenomena in H.V. Engineering », Me Graw Hill, PP. 52 – 80.

- [49] J. M Townsend, 1914, « Electricity in gases », Oxford university press.
- [50] J. M Townsend, 1948, « Electron in gases », Hutchinson. London.
- [51] G. Cooperman, 1981, « A theory for space-charge-limited current with application to electrical precipitation », IEEE Trans. Ind. Appl. 17, 236 – 239.
- [52] P. Cooperman, 1960, « A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities », Trans. Amer. Inst. Elec. Eng. Part 1, 79, 47 – 50.
- [53] P. Cooperman, A new technique for the measurement of corona field strength and current density in electrical precipitation, Trans. Amer. Inst. Elec. Eng., 75 (1956) pp. 64 –67.
- [54] Claude Gary, M. Moreau, l'effet de couronne en tension alternative, Eyrolles, (1976) pp. 7 – 33.
- [55] V.I. Popkov, Elektrichestvo, 1 (1949) pp. 33 – 48.
- [56] A.D. Moore, Electrostatics and its Applications, Wiley, New York, (1973).
- [57] J. Bohm, Electrostatic Precipitators, Elsevier, Amsterdam, 1982.
- [58] J.F. Hughes, Electrostatic Powder Coating, Wiley, New York, 1985.
- [59] J.M. Crowley, Fundamentals of Applied Electrostatics, Wiley, New York, 1986.
- [60] O.C. Ralston, Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids, Elsevier, Amsterdam, 1961.
- [61] L. Brands, P.M. Beier, I. Stahl, Electrostatic Separation, in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley–VCH Verlag, Weinheim, 2001.
- [62] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, I. Suarasan, Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators, J. Phys. D 27 (1994) 1242–1251.
- [63] Bastien François Olivier, Contribution à l'étude de la transition vers la décharge couronne, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, (1977).
- [64] Gérard Berger, Retard à la formation de la décharge couronne positive dans l'air, Université de Paris-Sud, (1980).
- [65] L.A. O'Hare, S. Leadley, B. Parbhoo, "Surface physicochemistry of corona discharge treated polypropylene film", Surface Interface Analysis, Vol. 33, N°. 4, pp. 335-342, 2002.
- [66] L. Dascalescu, T. Zegloul, A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment", Chapter 4, WEEE Recycling, Research, Development, and Policies, Amsterdam, Elsevier, pp. 75-106, 2016.
- [67] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu, "Characterization of dual corona-electrostatic electrodes for electrostatic processes applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, N°. 3, pp. 692-698, May-June 2008.

- [68] B. He, T. Li, Y. Xiu, H. Zhao, Z. Peng, Y. Meng, "Study on law of negative corona discharge in microparticle-air two-phase flow media", *AIP Advanced* 6, Vol. 6, N°. 3, 035114, 2016.
- [69] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator", *Journal of Electrostatics*, Vol. 70, N°. 1, pp. 20-24, 2012.
- [70] J.H. Lee, H.G. Kim, G.S. Khang, H.B. Lee, M.S. Jhon, "Characterization of wettability gradient surfaces prepared by corona discharge treatment", *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 151, N°. 2, pp. 563-570, 1992.
- [71] X. Li, L. Cai, X. Xu, Z. Wan, X. Ma, Y. Liu, "Analysis on corona discharge electrical characteristics of wind turbine blades", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 60, N°. 1, pp. 91-101, 2019.
- [72] A. Rahmani, O. Chibane, K. Smili, B. Bendahmane, A. Kasdi, L. Dascalescu, "Characterisation of a two-wire corona electrode", *Proc. The Electrical Engineering International Conference EEIC'2019, University of Bejaia, Algeria*, Vol. 1, pp. 4-7, 2019.
- [73] A.Y. Wardaya, M. Nur, J.E. Suseno, "A study of the corona discharge theory for multipoint-plane configurations", *Indian Journal of Physics*, Vol. 94, N°. 3, pp. 409-415, 2020.
- [74] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, M.B. Neagoe, A. Reguig, L. M. Dumitran, "Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a noncontact electrostatic voltmeter", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, N°. 4, pp. 2377-2384, Aug. 2016.
- [75] S. Chen, K. Li, S. Nijdam, "Transition mechanism of negative DC corona modes in atmospheric air : from Trichel pulses to pulseless glow", *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 28, N°. 5, 55017, 2019.
- [76] M. Rong, D. Liu, D. Wang, B. Su, X. Wang, Y. Wu, "A new structure optimization method for the inter-needle distance of a multi-needle-to-plane barrier discharge reactor", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 38, N°. 4, pp. 966-972, 2010.
- [77] H. Nouri, H. A. Said, Y. Zebboudj, N. Zouzou, and L. Dascalescu, "Analysis of electric field and current density in an electrostatic precipitator", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 665-670, 2016.
- [78] H. Pang, "Dépoussiérage Electrostatique pour Les Particules Submicroniques en Atmosphère Usuelle (Terre) et Raréfiée (Planète Mars) "Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2006.

## *Chapitre II*

# *Précipitateurs électrostatiques d'aérosols*

### **II.1 Introduction**

Les phénomènes électrostatiques ont été observés par les philosophes grecs vers 600 av.JC. Ils ont remarqué l'attraction de petites particules par l'ambre jaune (résine fossile) frotté sur la peau d'animal. Au début du 17<sup>ième</sup> siècle, William Gilbert a noté qu'un diélectrique frotté attire les particules de fumée produite par un feu éteint. Les relations quantitatives décrivant les forces électrostatiques ont été introduites par F. Coulomb au 18<sup>ième</sup> siècle. De nombreux rapports sur les effets électrostatiques voient le jour au début du 19<sup>ième</sup> siècle. Le premier appareil expérimental utilisant ces phénomènes est issu des travaux de Hohlfeld [1]. Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1850, Guitard avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée. En 1883, Lodge propose de purifier l'air dans les salles de fumeurs et dans les tunnels. Ce n'est qu'en 1907 que le premier électrofiltre conçu par Cottrell fonctionna de manière efficace. Le premier filtre électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux sont consacrés aux électrofiltres.

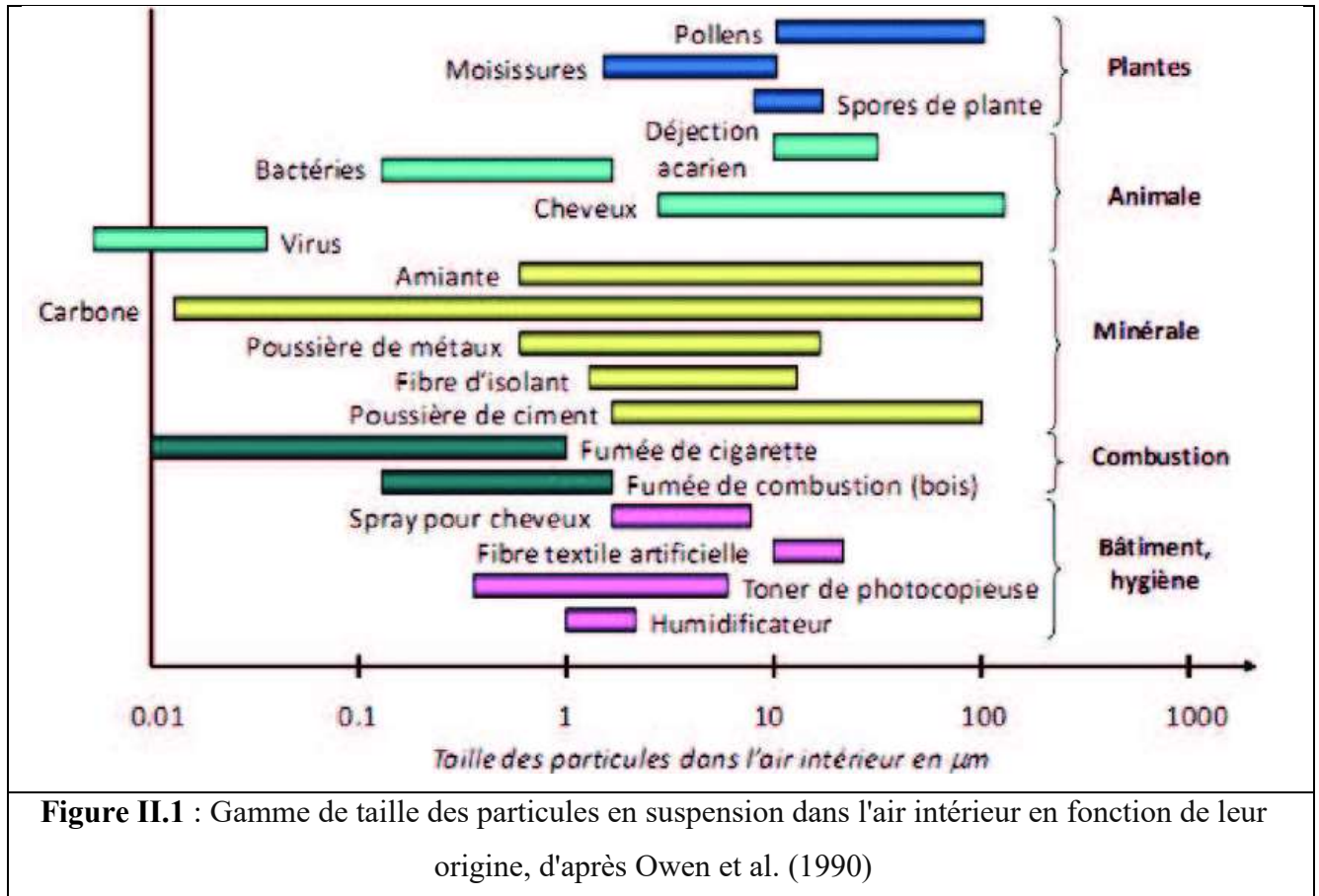
Les précipitateurs électrostatiques (ESP) utilisent directement l'énergie électrique pour contribuer à l'enlèvement de fines particules de tout genre de gaz d'échappement [2, 3]. Leur rendement est très haut. Des particules aussi petites qu'un dixième de micron peuvent être enlevées. Le système possède deux électrodes, isolées l'une de l'autre et portées à des potentiels différents. Quand un gaz chargé d'aérosols traverse l'espace inter électrodes, en se chargeant en électricité ces aérosols se précipitent vers les. Nous allons présenter dans ce chapitre les principaux éléments constituant les précipitateurs électrostatiques d'aérosols et décrire leur principe de fonctionnement.

### **II.2 Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement**

Les particules en suspension dans l'air, ou aérosols, sont constituées de substances solides et/ou liquides, présentant une vitesse de chute le plus souvent négligeable. La présence de particules en suspension dans l'air est principalement due à la pollution atmosphérique. La pollution atmosphérique est due au fait que l'homme introduit, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, des substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives excessives [1]. La taille des particules est le paramètre le plus important pour caractériser le comportement des aérosols. Il existe presque toutes les formes et tailles de particules suivant leur nature et selon qu'elles

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

proviennent d'agrégats de matière solide ou liquide en suspension dans l'air [2]. On distingue ainsi classiquement deux types de particules : les PM10 (Particulate Matter) qui sont celles dont le diamètre moyen n'excèdent pas 10  $\mu\text{m}$  et qui proviennent principalement des véhicules (en particulier de ceux équipés d'un moteur diesel) et les PM25 dont le diamètre moyen est inférieur à 25  $\mu\text{m}$  et qui sont majoritairement émises par des sources fixes. Les particules les plus petites, de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ , sont susceptibles de pénétrer le plus profondément dans l'appareil broncho-pulmonaire [3-4-5].



**Figure II.1** : Gamme de taille des particules en suspension dans l'air intérieur en fonction de leur origine, d'après Owen et al. (1990)

Les particules ou poussières ne constituent pas un polluant ordinaire. Alors que pour toutes les autres substances, il suffit de mesurer le poids des émissions pour avoir une idée exacte sur la façon dont évolue la qualité de l'air, pour les particules le problème est plus complexe. En effet, leur toxicité n'est pas directement liée à leur poids. Au contraire, les particules les plus fines sont généralement considérées comme les plus dangereuses en raison de la difficulté à les piéger par des filtres, de leur capacité à pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire et de leur plus long temps de suspension dans l'air.

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

De nombreuses techniques de filtration de l'air destinées à répondre au problème croissant de la pollution atmosphérique ont été mises au point, notamment pour le secteur industriel. On regroupe les dispositifs qui les utilisent en quatre catégories :

- les filtres mécaniques,
- les filtres hydrauliques,
- les filtres à couche filtrante,
- les filtres électriques ou électrofiltres.

### II.3 Forces à l'origine de la migration des particules chargées

Dans la nature, les particules peuvent être soumises à diverses forces : les forces de volume (Force de flottabilité, force électrique, force magnétique, par exemple) et les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, par exemple). Dans cette rubrique, nous n'évoquerons que les deux forces électriques mises en jeu, à savoir, la force de Coulomb et la force diélectrophorétique.

#### II.3.1 Force de Coulomb

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique  $E$ , les particules ayant acquis une charge électrique  $q_p$  subissent la force de Coulomb  $F_e$  proportionnelle à la charge et s'expriment :

$$\vec{F} = q_p \cdot \vec{E} \quad (2.1)$$

L'expression (2.1) est l'équation de base de la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les précipitateurs électrostatiques.

#### II.3.2 Force diélectrophorétique

De nombreux travaux ont été effectués sur la force diélectrophorétique (DEP) agissant sur des particules allant des poussières aux cellules biologiques. Cette force s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la particule ( $\propto d_p^3$ ) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué  $(\nabla \vec{E})^2$ . Pour une sphère diélectrique de diamètre  $d_p$ , l'expression est :

$$\overline{F_{DEP}} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_m d_p^3 K (\nabla \vec{E})^2 \quad (2.2)$$

La constante K est définie par :

$$K = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m} \quad (2.3)$$

Où  $\varepsilon_s$  et  $\varepsilon_m$  sont les permittivités respectives de la sphère et du milieu [6].

#### **II.4 Mécanismes de charge des particules**

Les fines particules en suspension dans l'air peuvent recueillir des charges électriques grâce à plusieurs mécanismes qui sont : la charge « naturelle » par attachement des ions existant dans l'atmosphère, la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion; les ions gazeux étant produit dans ce cas principalement à l'aide d'une source radioactive ou d'une décharge électrique). La densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire (utilisée pour la neutralisation de l'aérosol).

##### **➤ Charge naturelle par attachement des ions**

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Comme présenté par Hinds [7], l'air contient environ 1000 ions/cm<sup>3</sup> avec en première approximation un nombre égal d'ions positifs et négatifs. Les particules d'aérosol qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposée. Donc, ce processus tend vers un état d'équilibre appelé « distribution de charge en équilibre de Boltzmann ». Cet équilibre de Boltzmann représente la distribution de charge d'un aérosol en présence d'ions bipolaires. **Le Tableau II.1** montre le pourcentage de particules de taille donnée ayant la charge indiquée. La distribution est symétrique ; la fraction des particules avec n charges positives étant égale à la fraction avec n charges négatives.

Pour des concentrations égales d'ions positifs et négatifs dans l'air, en première approximation la fraction des particules  $f_n$  de taille donnée ayant n charges élémentaires positives ou négatives est donnée par :

$$(2.4)$$

où  $K_E$ , constante électrostatique ; e, charge élémentaire ;  $d_p$ , diamètre de particule ;  $k_B$ , constante de Boltzmann ; T, température.

## *Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols*

$d_p$ (μm)	Pourcentage des particules portant le nombre indiqué de charges								
	< -3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	> +3
0,01				0,3	99,3	0,3			
0,02				5,2	89,6	5,2			
0,05			0,6	19,3	60,2	19,3	0,6		
0,1		0,3	4,4	24,1	42,6	24,1	4,4	0,3	
0,2	0,3	2,3	9,6	22,6	30,1	22,6	9,6	2,3	0,3
0,5	4,6	6,8	12,1	17,0	19,0	17,0	12,1	6,8	4,6
1,0	11,8	8,1	10,7	12,7	13,5	12,7	10,7	8,1	11,8
2,0	20,1	7,4	8,5	9,3	9,5	9,3	8,5	7,4	20,1
5,0	29,8	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	5,8	5,4	29,8
10,0	35,4	4,0	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,0	35,4

**Tableau 11.1** Distribution de charge sur une particule en équilibre de Boltzmann [7]

### ➤ **Triboélectrisation**

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact. Dans la charge par frottement, c'est-à-dire quand deux particules (ou particule/substrat) différentes frottent l'une contre l'autre, il y a un transfert d'électrons (charges) à partir de la surface d'une particule vers celle de l'autre. Ce processus utilise la différence de structure électronique des deux surfaces en fonction desquelles une des particules devient positivement chargée et l'autre négativement chargée. Ce phénomène fait que dans les nuages de particules entraînées par un flux d'air, une forte proportion des particules est chargée par contact avec les parois ou par collisions. La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et nonconductrices de surfaces solides [7-9]. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques [7]. Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que 65% environ.

### ➤ **Charge par charge d'espace ionique**

Nous présentons dans cette section la phénoménologie de la charge des particules dans un champ électrique affecté par une charge d'espace ionique. Les mécanismes de charge sont expliqués et on

## **Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols**

présente, d'une manière critique, les modèles théoriques de charge les plus souvent utilisés dans l'étude de la précipitation électrostatique. Précédemment, nous avons dit que la force de Coulomb qui s'exerce principalement sur les particules chargées, est la principale cause de mise en mouvement des particules dans les filtres électrostatiques. Une augmentation de la charge des particules est donc nécessaire afin de produire leur migration vers les électrodes collectrices du précipitateur. Cela peut être provoqué par une forte densité d'ions due à une décharge couronne dans l'espace interélectrodes. Ce mécanisme de décharge sera décrit par la suite. Le processus de charge dépend alors de plusieurs facteurs parmi lesquels les plus importants sont la densité de charge ionique, l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules. De nombreuses études [7] ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué à deux mécanismes : la charge par champ la charge par diffusion Quel que soit le mécanisme, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble et leur importance relative est déterminée principalement par les dimensions des particules et l'intensité du champ électrique [10-12].

### **II.4.1 La charge par champ**

Comme le suggère son nom, ce mécanisme de charge est relié à l'action du champ électrique. Une particule présente dans un gaz provoque une distorsion locale du champ électrique; les lignes de champ aboutissent à la surface de celle-ci. Cette distorsion locale du champ dépend de la nature de la particule : lorsque la particule est conductrice la distorsion du champ est maximale. Pour une particule non-conductrice (isolante), la perturbation du champ dépend de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la particule. Dans ce cas, les ions présents dans le gaz qui se déplacent le long des lignes de champ électrique, peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule change la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent d'atteindre la surface de celle-ci. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis la charge de saturation par champ  $q_s$  [9].

Une première théorie concernant la charge par champ a été développée en 1923 par Rohmann cité par [10] et elle a été complétée par Pauthenier [13][14] en 1932. Ces auteurs montrent que les ions arrivent sur une particule tant que la charge de celle-ci n'est pas suffisante pour les repousser ; on parle alors d'une charge limite par champ  $q_s$ . Pauthenier a montré qu'à cause du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Continuant dans le même esprit, d'autres auteurs ont apporté des contributions complémentaires [15][16][17].

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

D'après McDonald [18], ce mécanisme de charge est prépondérant tant que la taille des particules est supérieure à environ 0,5  $\mu\text{m}$ . La quantité de charge acquise par les particules dépend de leur diamètre, du champ électrique, de la densité d'ions présents, du temps de présence des particules dans le champ électrique, de la mobilité des ions et de la constante diélectrique  $\epsilon_p$  de la matière constituant les particules. Ce processus de charge par champ cesse lorsque la particule porte une charge de saturation qui s'écrit [7] :

$$q_s = \left(\frac{3}{\epsilon_p + 2}\right) \left(\frac{E d_p^2}{4K_E e}\right) \quad (2.4)$$

Où  $d_p$  est le diamètre des particules et  $E$  est le champ électrique.

### II.4.2 La charge par diffusion

Le processus de charge par diffusion a été imaginé pour expliquer la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible (ou même nul) et lorsque la taille des particules est suffisamment petite (quelques libres parcours moyens). Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge [10] [11]. Ce mécanisme met en jeu la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique. Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions ont une répartition uniforme autour des particules. Dans ces conditions, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité de choc avec les ions et la particule peut accumuler une certaine charge électrique. Ce mécanisme de charge par diffusion a une importance plus grande pour les particules très fines, d'un diamètre inférieur à 0,5  $\mu\text{m}$  [10] [12]. Dans la charge par diffusion, la quantité de charge accumulée dépend de la taille des particules, de la densité des ions, de la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, de la constante diélectrique de la particule, de la température absolue du gaz, du temps de présence des particules au sein du champ. Selon Friedlander [19], l'expression de la charge d'une particule en fonction du temps s'écrit :

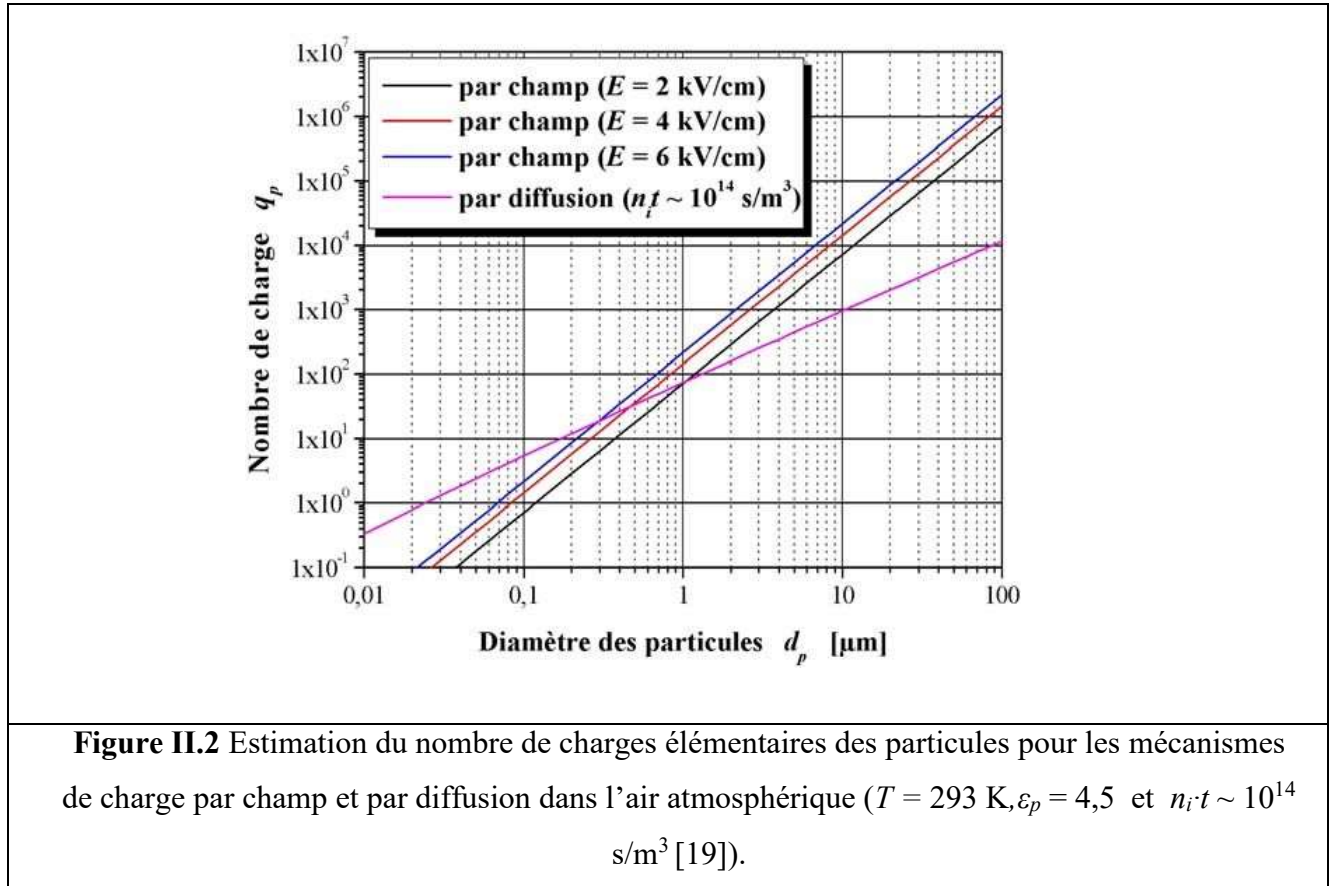
$$q(t) = \frac{d_p K_B T}{2e^2} \ln\left(1 + \frac{2\pi}{n_i K_B T}\right)^{1/2} d_p e^2 n_i t \quad (2.5)$$

Où  $n_i$  est la concentration des ions,  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $m_i$  est la masse des ions,  $T$  est la température et  $t$  est le temps de charge.

La charge acquise est proportionnelle à  $d_p^2$  pour le mécanisme de charge par champ et à  $d_p$  pour la charge par diffusion ; la charge par champ est le mécanisme dominant pour les particules plus grandes que 1  $\mu\text{m}$ , et la charge par diffusion est le mécanisme dominant pour les particules plus petites que 0,1

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

$\mu\text{m}$ , même en présence d'un champ électrique. Entre 0,1 et  $1\mu\text{m}$ , ces deux mécanismes fonctionnent en même temps et la situation est beaucoup plus compliquée. Dans la Figure 1.3, on voit que les particules de taille inférieure à  $0,1\mu\text{m}$  ont acquis statistiquement moins d'une charge élémentaire par champ et que le mécanisme par diffusion est également inefficace pour les particules plus petites que  $0,03\mu\text{m}$ .

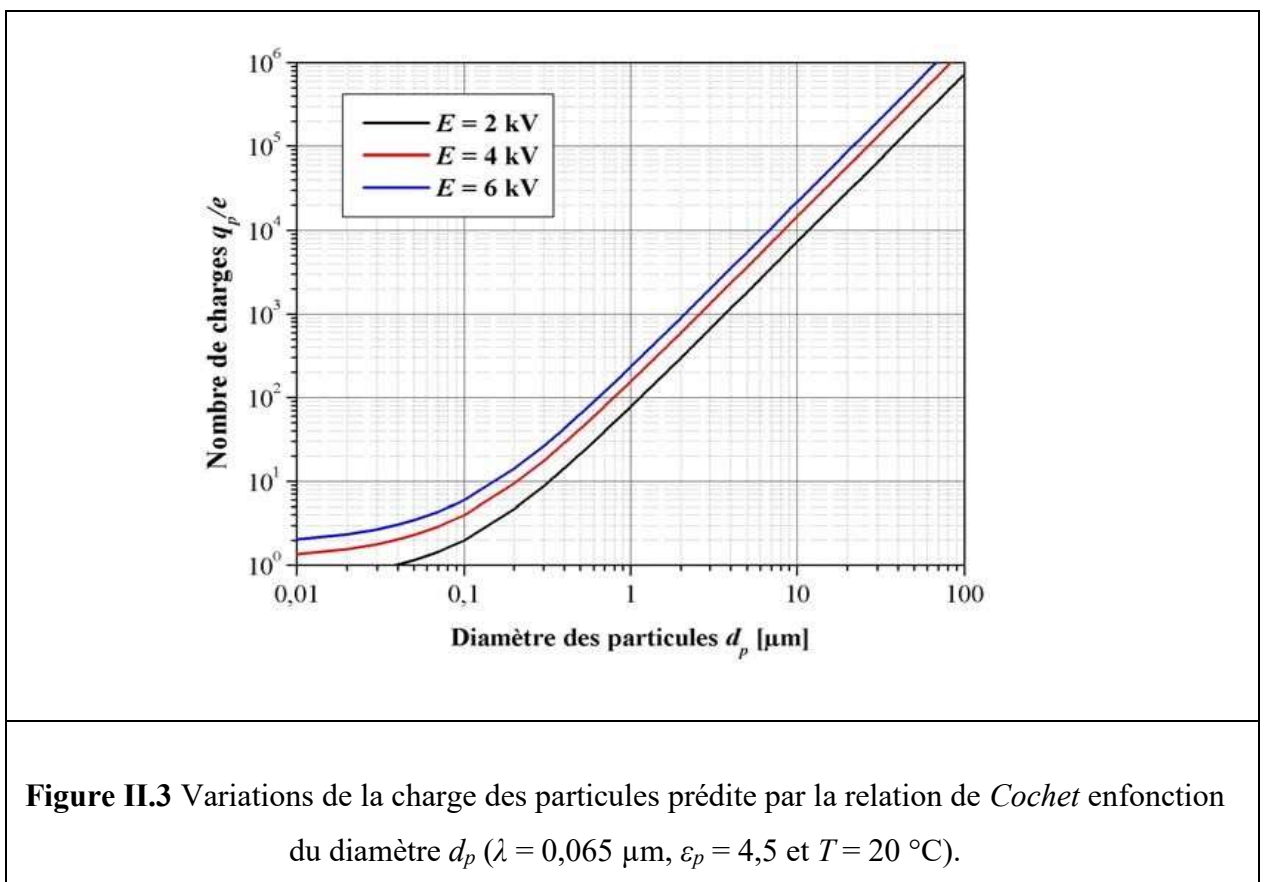


### II.4.3 La charge mixte

Pratiquement, les deux mécanismes agissent ensemble pour les particules de taille comprise entre  $0,5$  et  $1\mu\text{m}$  dans l'air. Cependant, la charge totale acquise par une particule n'est pas simplement la somme de la charge par champ et de la charge par diffusion. Les deux mécanismes interagissent et plusieurs traitements approchés ont été proposés pour résoudre ce problème très complexe [18] [20]. Smith & McDonald [21] ont développé un modèle de charge des particules basé sur la théorie cinétique et qui tient compte simultanément des mécanismes de charge par champ et de charge par diffusion. En considérant que la charge des particules est très largement due au mouvement d'agitation thermique des ions, le champ électrique externe ne représente qu'un facteur perturbateur du phénomène de charge par diffusion. Ces auteurs considèrent qu'au voisinage d'une particule chargée, la distribution des ions est modifiée par le champ électrique.

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

Des travaux plus récents sur le processus de charge ont été développés par Fjeld [25] [26] en 1989. L'auteur considère qu'une particule peut accumuler une certaine charge sous l'effet du champ électrique ou par diffusion, suivant l'importance des deux mécanismes. Il établit des relations pour la charge par champ et par diffusion en tenant compte du couplage entre les deux mécanismes. Pour cela il distingue deux régimes de charge : un régime où la charge par champ et la charge par diffusion sont présentes en même temps ; un autre où la particule a atteint la charge limite par champ et où seule la charge par diffusion intervient. Les relations établies par Fjeld conduisent à des valeurs de charge cohérentes avec les résultats expérimentaux obtenues en 1957 par Hewitt [24] mais seulement dans le cas où le champ électrique extérieur est faible.



Lawless & Altman [20] ont amélioré le modèle de Fjeld en modifiant les lois de charge qui, cette fois-ci, conduisent à de bons résultats même dans le cas où le champ électrique extérieur est important. A partir d'arguments physiques, ils obtiennent des relations assez simples qui prennent en compte les interactions des mécanismes de charge. En définitive, pour relier la vitesse de migration  $wE$  à la taille des particules on fera appel à une relation établie par Cochet [25].

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

Elle donne la charge limite d'une particule qui se trouve dans un champ électrique d'intensité E en tenant compte de manière indirecte de l'effet de la charge par diffusion (elle offre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux pour  $d_p > 0,3 \mu\text{m}$  [25]) :

$$q_p^s = \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1+2\lambda/d_p}\right) \left(\frac{\varepsilon_p+1}{\varepsilon_p+2}\right) \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \quad (2.6)$$

Ici  $\lambda$  est le libre parcours moyen des molécules et  $\varepsilon_0$  est la permittivité de vide. La Figure 1.4 présente les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules ( $\varepsilon_p = 4,5$ ) en considérant plusieurs valeurs de l'intensité du champ électrique E.

### II.5 Architecture des précipitateurs électrostatiques

Selon la nature du gaz, la taille ou la concentration des particules, il existe deux grandes familles de systèmes d'élimination de poussières :

- **les filtres humides**, qui regroupent les laveurs venturisés, les épurateurs centrifuges, les électrofiltres humides...
- **les filtres secs**, comme par exemple les filtres céramiques, les filtres à haute efficacité (HEPA) ou encore les précipitateurs électrostatiques secs, objet de cette thèse [27]–[28]. Historiquement, vers 600 av. J.C., le savant Thalès découvrit que l'ambre jaune (dont le nom grec est elektron) possède la propriété d'attirer les corps légers une fois frottée. En 1600, W. Gilbert met en évidence que d'autres matériaux (verre, résine) possèdent également cette capacité d'attraction. Ce phénomène sera nommé électricité statique. C. A. Coulomb définit en 1785 les premières lois d'interaction électrostatique.

Utilisant ces avancées scientifiques, O. Lodge élabore, en 1883, le concept de précipitateur électrostatique (ESP, pour ElectroStatic Precipitator), encore appelé électrofiltre. Il réalise ainsi les premières expériences de collecte de particules. Cependant, les connaissances scientifiques dans le domaine des hautes tensions étaient insuffisantes et ont conduit à des échecs. Il faudra attendre 1907 et l'avènement des hautes tensions pour que F. G. Cottrell développe un collecteur de brumes acides. Le succès de cet électrofiltre a conduit à son expansion et à son utilisation jusqu'à nos jours, dans des domaines très variés et pour des sources de pollution diverses.

### II.5.1 Electrofiltres à un seul étage

Les électrofiltres à un seul étage sont les plus utilisés dans les applications industrielles. L'ionisation et la collecte des particules sont réalisées simultanément tout au long de l'électrofiltre (figure (II.4)). Ils n'occasionnent que de faibles pertes de charge (50 – 100 Pa) et sont donc recommandés pour traiter les grands débits gazeux (80 000 m<sup>3</sup>/h par exemple). Le rendement d'épuration peut atteindre 99 % pour des particules fines de l'ordre du micromètre [12]. Le minimum d'efficacité apparaît pour des poussières de diamètre égal à 0.2 µm. Cependant le coût d'investissement est très élevé et la dépense électrique est de l'ordre de 1 Wh/m<sup>3</sup> traité [10].

Les électrofiltres secs comportent les éléments suivants : un caisson, des électrodes émissives (fil ou grille) et collectrices (plaque), des systèmes de battage des électrodes et d'extraction des poussières (souvent un frappage périodique des électrodes par marteaux), un dispositif de répartition des gaz. Leur efficacité est maximale pour des vitesses d'écoulement de l'ordre 1 à 4 m/s et une alimentation haute tension (de 30 à 120 kV pour un courant de 20 à 600 mA).

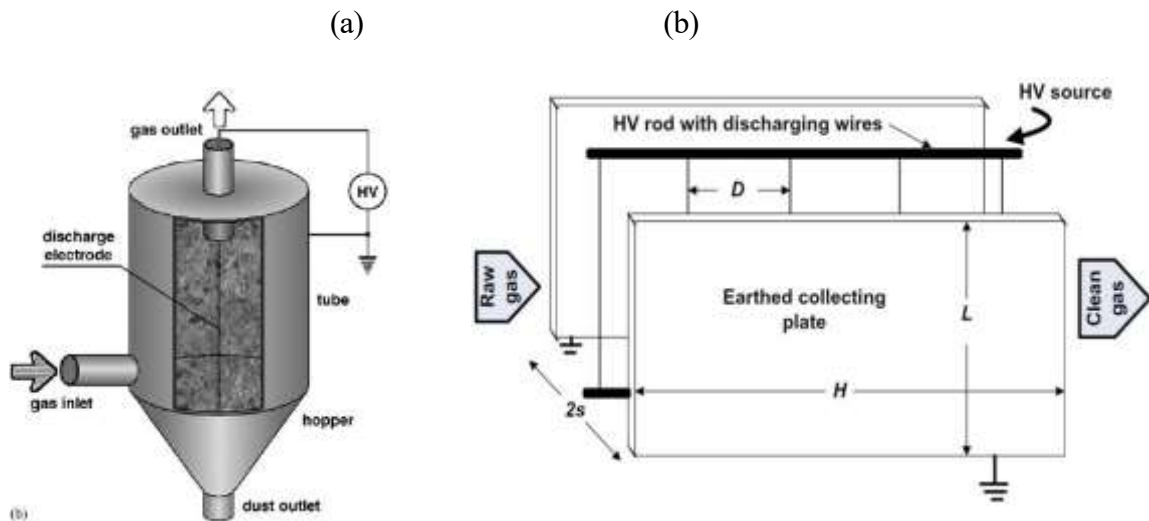


Figure II.4 : Electrofiltres classiques à un étage : (a) fil / cylindre [30] et (b) fil / plan [31]

### II.5.2 Electrofiltres à double étage

Les filtres électrostatiques à double étage sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivi d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des installations de conditionnement d'air. Les deux étages d'un tel filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension.

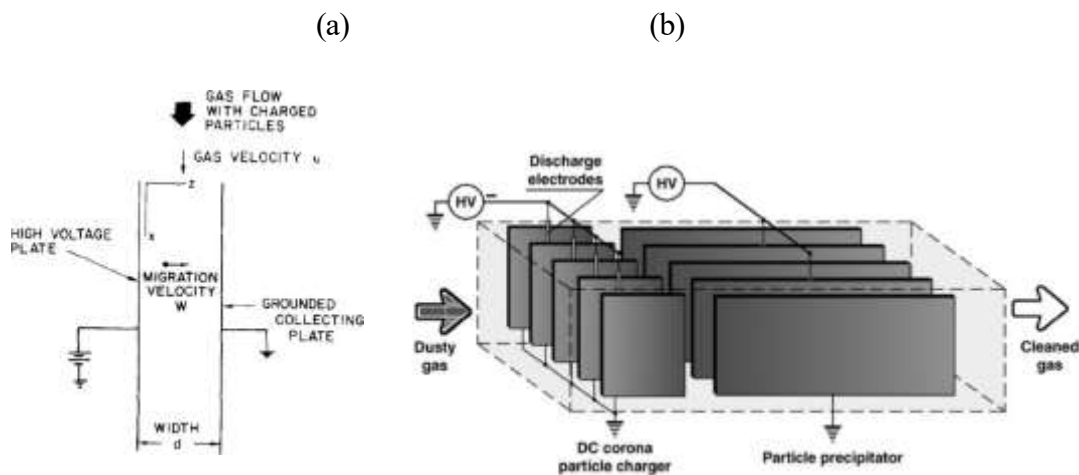


Figure II.5 : Electrofiltre de type plan / plan : (a) à un étage [32] et (b) à deux étages [30]

### II.5.3 Electrofiltres humides, secs

Dans un électrofiltre humide, la récupération des poussières collectées se fait en faisant couler un liquide de manière continue ou périodique sur les électrodes. Cela permet d'éliminer les polluants gazeux en évitant la formation de décharges électriques particulièrement pénalisantes dans le fonctionnement de l'ESP, appelées « back corona » [29].

Nous reparlerons largement par la suite de ce type de décharges. L'inconvénient d'un électrofiltre humide est la génération d'un déchet secondaire (liquide contaminé) à traiter, mais aussi une température limite d'utilisation de 90°C, pour éviter une vaporisation rapide de l'eau. Le principe de base est identique à électrofiltres secs. La différence provient de la présence d'un film humide ruisselant sur l'électrode collectrice. L'effluent à traiter est saturé en vapeur d'eau qui permet, par l'intermédiaire de la condensation d'augmenter la taille des particules [35]. Ce procédé autorise une efficacité de collection moins sensible aux caractéristiques électriques de la particule et permet l'épuration d'effluents chargés en particules, difficilement réalisable avec un électrofiltre sec. En effet, cette

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

procédure limite l'effet de contre-émission pour les particules dont la résistivité est trop forte ainsi que le phénomène de réentraînement pour celles dont la résistivité est trop faible. Malgré ces inconvénients, les électrofiltres humides sont présents dans certaines applications pratiques en raison de quelques avantages, parmi lesquels les plus importants sont :

- Les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électrofiltres secs ;
- Le réentraînement des particules collectées est inexistant ;
- Les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières.

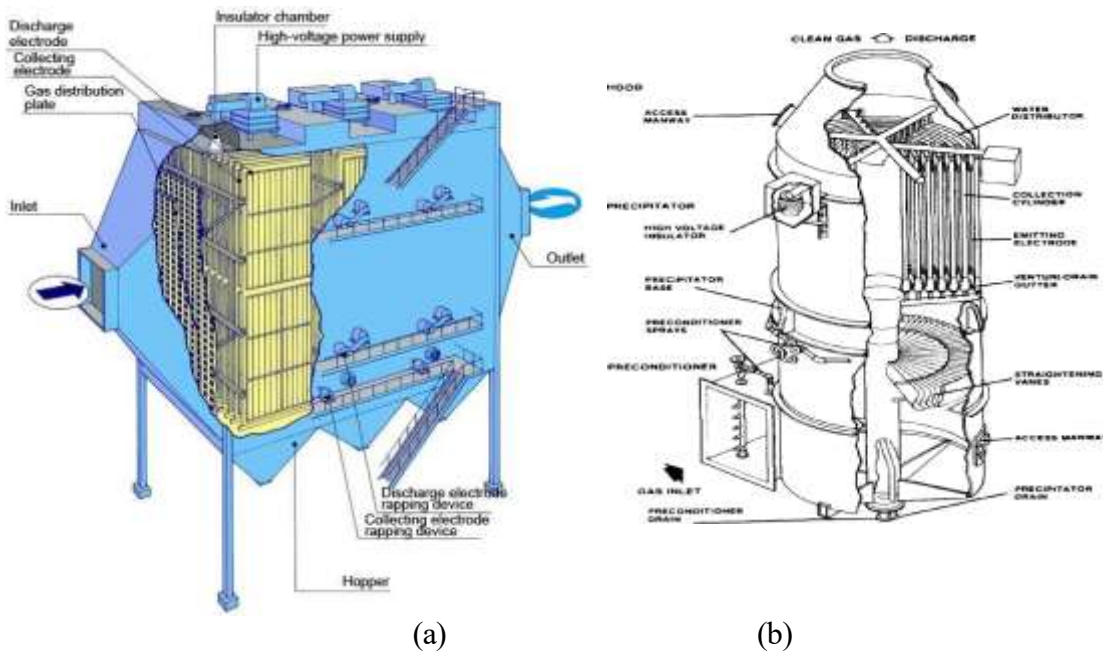


Figure II.6 : Electrofiltres : (a) sec [33] et (b) humide [34]

### II.6 Modèles du fonctionnement d'un électrofiltre

#### II.6.1 Modèle laminaire

C'est le modèle analytique le plus simple du fonctionnement d'un électrofiltre. Il considère un écoulement laminaire du gaz avec un profil de vitesse de Poiseuille, entre deux plaques parallèles portées à des potentiels électriques différents. On admet que les particules en suspension dans le gaz ont toutes la même charge électrique. Elles se déplacent dans la direction axiale avec la vitesse moyenne de l'écoulement et subissent l'action du champ électrique uniforme. Les trajectoires sont donc des lignes droites déterminées par les vitesses  $U_g$  et  $w_{th}$  (figure (II.7)) [10], [11].

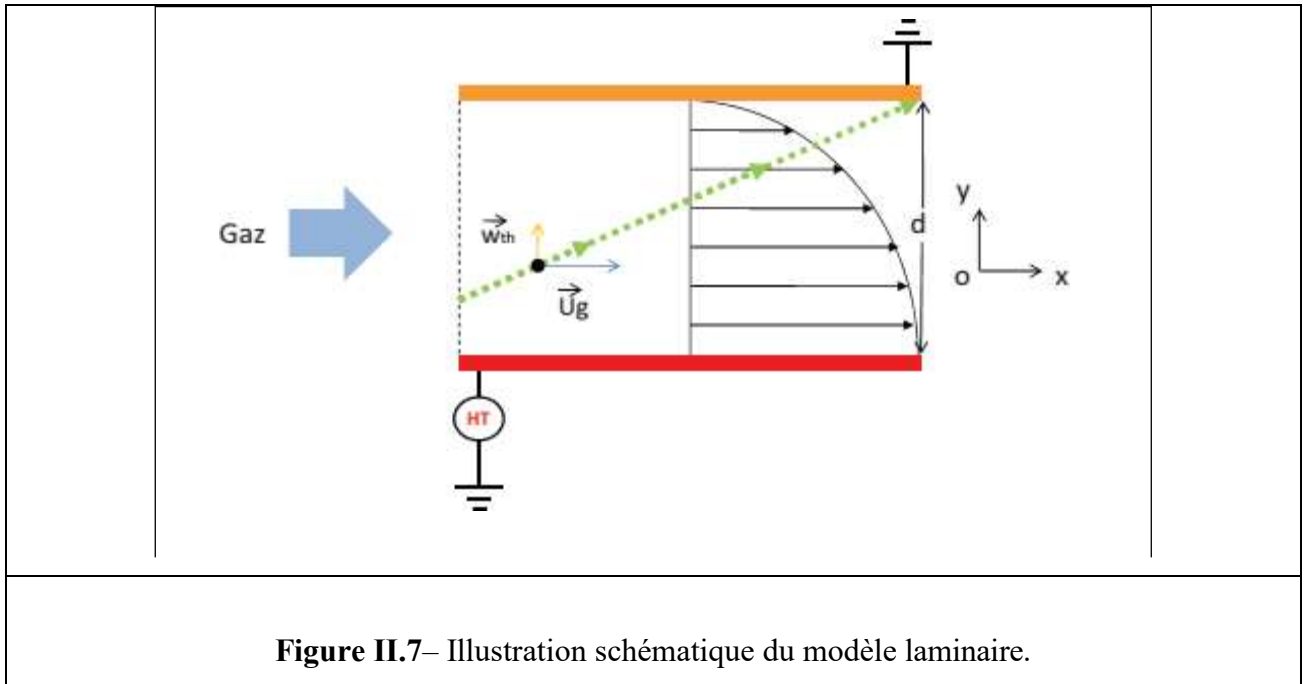


Figure II.7– Illustration schématique du modèle laminaire.

Pendant ce temps, la particule se déplaçant dans la direction d'écoulement du gaz aura parcouru une distance :

$$L_D = \overline{U}_g \frac{d}{W_{th}} \quad (2.7)$$

Où  $\overline{U}_g$  est la vitesse moyenne du gaz. Donc toutes les particules de même taille, identiquement chargées, seront collectées à une distance égale ou inférieure à  $L_D$ . L'efficacité fractionnaire  $\eta_f$  de collection peut être alors calculée par la relation suivante :

$$f(d_p) = \min\left[\frac{W_{th}(d_p \cdot E \cdot q_p) \cdot L}{\overline{U}_g \cdot d}\right], \quad (2.8)$$

Ce schéma est très éloigné de la réalité. Tout d'abord, les conditions électriques réelles peuvent être très différentes de ce schéma de particules chargées instantanément se déplaçant dans une zone de champ électrique uniforme. Cependant, l'hypothèse la plus forte est celle d'un écoulement laminaire du gaz. Malgré tout, dans le cas de certains précipitateurs à double étage, ce modèle peut constituer le point de départ de l'étude sur la collection des particules

III.6.1 Modèle de Deutsch

Dans les précipitateurs électrostatiques industriels, l'écoulement du gaz est toujours turbulent. Le mouvement des particules est essentiellement déterminé par la présence simultanée des tourbillons et des forces électriques qui s'exercent sur elles. Ainsi, les trajectoires des particules sont très compliquées et ne peuvent pas, en général, être déterminées par des expressions analytiques. Deutsch [36], suite à une analyse théorique, a établi une dépendance entre l'efficacité de collecte et les dimensions du précipitateur. Dans son modèle, il distingue deux zones dans le filtre électrostatique :

- Le cœur du précipitateur, où la concentration des particules est considérée comme uniforme dans la section transversale. La vitesse moyenne d'écoulement est supposée constante.
- Les couches limites d'épaisseur situées au voisinage des plaques collectrices, où l'écoulement du gaz est considéré comme uniforme (Figure II.8).

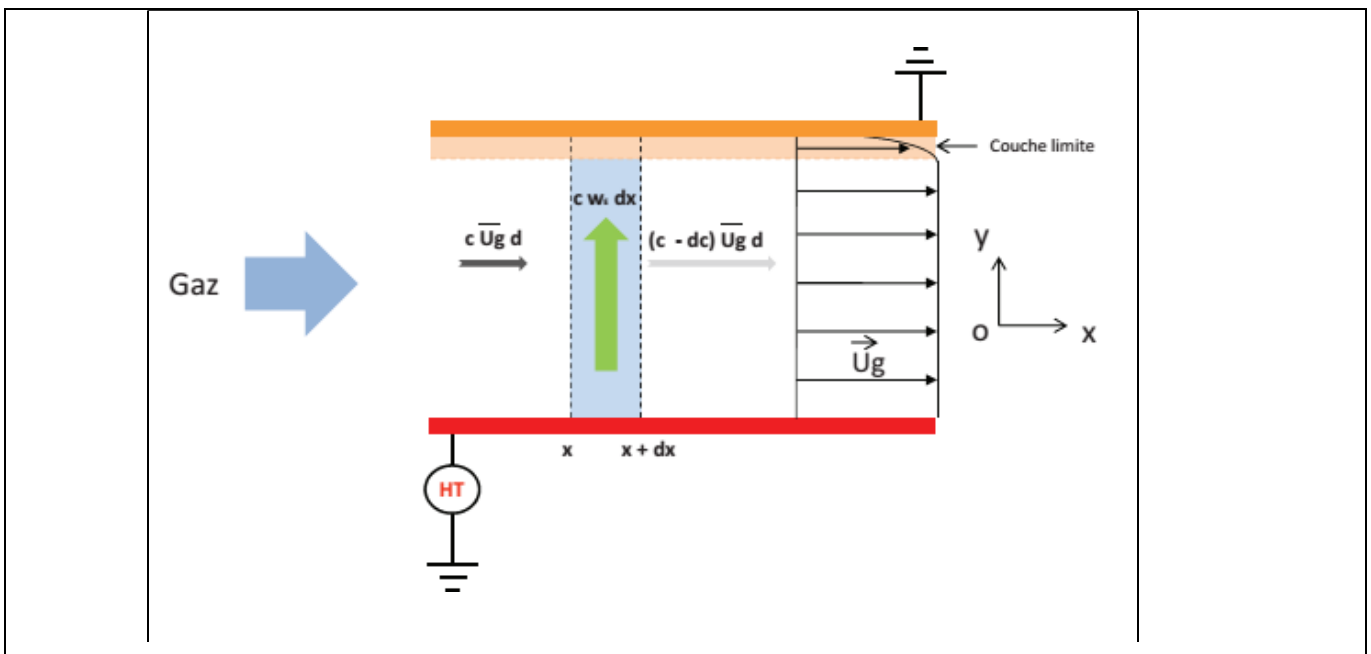


Figure II.8 – Modèle de Deutsch : schéma des couches laminaires et bilan massique de particules sur une longueur  $dx$ .

Considérer une concentration de particules comme uniforme dans toute la section transversale du filtre revient à supposer qu'il existe un mélange parfait de suspension gaz particules. Ceci revient en fait à considérer une turbulence infinie dans le cœur du précipitateur.

## *Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols*

Une particule ne peut être collectée que si elle se trouve dans la couche laminaire située près de chaque paroi, là où les forces de Coulomb dominent les forces visqueuses. Dans cette zone, le champ électrique est supposé uniforme et la vitesse des particules dans la direction perpendiculaire aux plaques est supposée constante et de valeur calculée en utilisant l'équation (V.19).

Considérons deux sections transversales situées à une distance  $dx$  l'une de l'autre, dans la direction d'écoulement du gaz (Figure V.10). Dans le volume  $(dx \cdot h \cdot d)$ , où  $h$  représente la hauteur des plaques, on distingue :

$C \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d$  : le flux des particules qui entrent par la section située à l'abscisse  $x$ .

$(c - dc) \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d$  : le flux des particules non collectées sortant par la section située à l'abscisse  $x + dx$ .

$C \cdot W_E \cdot h \cdot d \cdot dx$  : le flux de particules captées sur la longueur  $dx$ .

Par un bilan massique, on trouve :

$$C \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d = (c - dc) \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d + C \cdot W_E \cdot h \cdot d \cdot dx \quad (2.8)$$

En intégrant sur toute la longueur du filtre, on obtient la relation entre la concentration des

particules à l'entrée et celle à la sortie du précipitateur :

$$C_s(d_p) = C_e(d_p) \cdot \exp\left[-\frac{w_E(d_p) \cdot L}{d \overline{U}_g}\right] \quad (2.9)$$

Ce qui conduit à la formule de Deutsch-Anderson [37] :

$$C_g(d_p) = 1 - \exp\left[-\frac{w_E(d_p) \cdot L}{d \overline{U}_g}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{w_E(d_p) \cdot S}{D_g}\right] \quad (2.10)$$

Où  $S$  est la surface totale des électrodes collectrices et est le débit volumique du gaz.

Le modèle de Deutsch ignore tous les phénomènes qui peuvent diminuer le rendement de collecte, comme le réentraînement des particules collectées par le flux gazeux et l'influence de la charge d'espace des particules sur la décharge, entre autres.

II.6.2 Modèle de Leonard, Mitchner et Self

L'efficacité globale de filtration peut être calculée à partir de l'équation de diffusion des particules

$$D_{p,y} \frac{\partial^2 C_p}{\partial y^2} + D_{p,x} \frac{\partial^2 C_p}{\partial x^2} + v_e \frac{\partial C_p}{\partial y} - v_m \frac{\partial C_p}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

Où x est dans le sens de l'écoulement, sens longitudinal, y perpendiculaire à la paroi de l'électrofiltre,  $D_{p,i}$  sens transversal, coefficient de dispersion dans la direction considérée et  $C_p$  est la concentration des particules ( $m^{-3}$ ). Les différents modèles d'efficacité théoriques sont des solutions analytiques plus au moins simplifiées de l'équation de diffusion des particules [40]. À l'inverse de Deutsch, où la répartition des particules est considérée uniforme dans chaque section transversale, ce qui est contestable, le modèle de Leonard *et al.* consiste à résoudre dans la géométrie donnée l'équation de conservation pour les particules de concentration  $C_p$  [10]. Il propose une relation permettant de prédire l'efficacité de collecte à partir des vitesses de migration et du coefficient de diffusion turbulente. En pratique, quand la valeur  $D_t$  est finie, pour l'efficacité fractionnaire on a :

$$(\eta_f)_{Leonard} > (\eta_f)_{Deutsch}$$

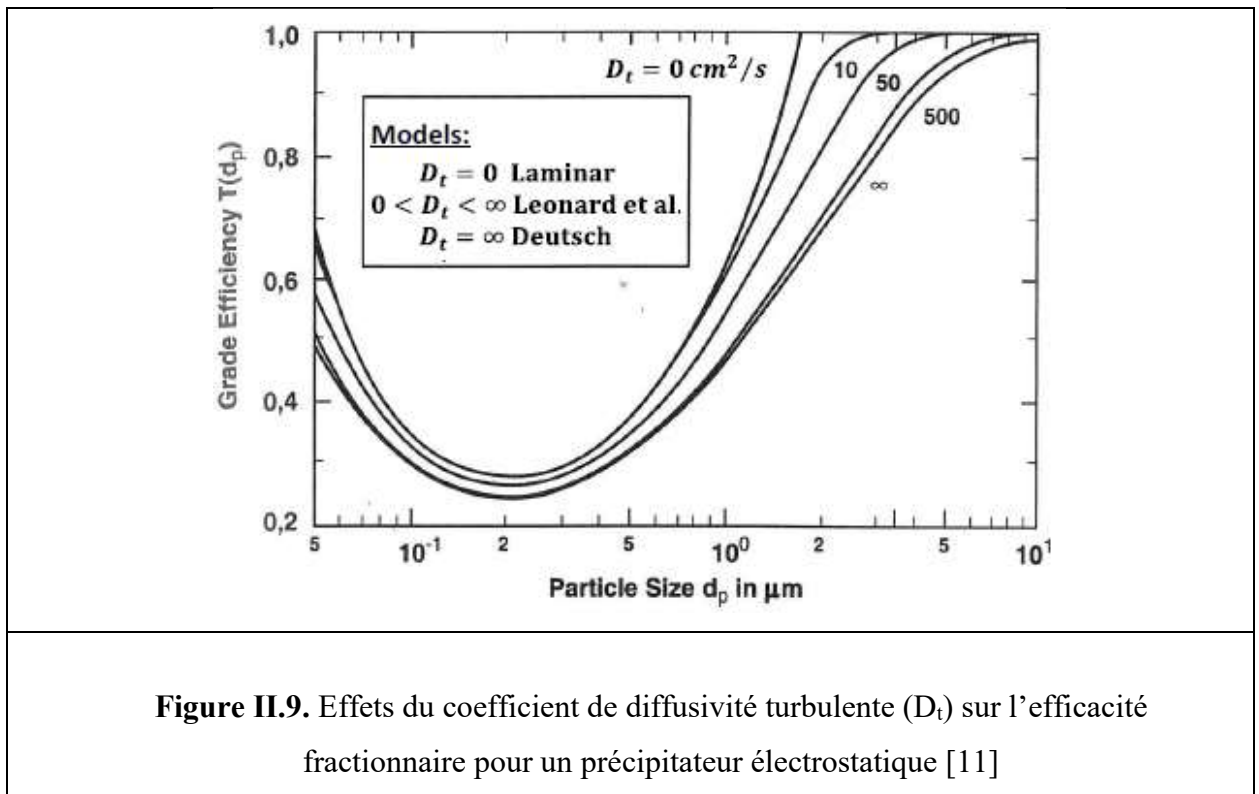


Figure II.9. Effets du coefficient de diffusivité turbulente ( $D_t$ ) sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique [11]

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

Compte tenu des différences entre le modèle Laminaire et le modèle de Deutsch qui ne correspondent ni l'un ni l'autre à la réalité, compte tenu de la complexité des équations, les modèles de diffusivité finie ne sont pas recommandés pour la modélisation de cas pratiques (la simulation de l'efficacité de collecte à partir d'une équation analytique du type I.30 contient des contradictions lorsque le caractère local du champ électrique est considéré). Pour les numériciens, certains de ces modèles constituent de bons outils de prédiction de l'efficacité de collecte. Cependant dans la pratique, de nombreux phénomènes peuvent considérablement la détériorer à savoir la résistivité apparente des particules traitées [38] [41], le phénomène de réentraînement [42] [43], le phénomène de « *back corona* » [44] [45], et l'extinction de la décharge par la charge d'espace [39] [46].

### II.7 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte

Le rendement de collecte d'un précipitateur électrostatique est élevé, approchant les 100%. Plusieurs installations ont des rendements de 98% et de 99%. Quelques matières s'ionisent plus facilement que d'autres et sont ainsi plus appropriés pour l'élimination par précipitation électrostatique. Pour les brumes d'acide et les unités de récupération catalytiques, les rendements dépassent souvent 99% ; pour le carbone noir, le rendement normal de collecte est inférieur à 35%, à cause de sa tendance de s'agglomérer. Cependant, par une combinaison adéquate d'un précipitateur électrostatique avec un collecteur cyclonique, on peut obtenir de hauts rendements pour cette matière. Les performances globales du fonctionnement d'un électrofiltre sont quantifiées par une grandeur nommée efficacité totale de collecte (ou rendement de collecte)  $\eta$ , définie par l'expression suivante [51] :

$$\eta = 1 - \frac{n_s}{n_e} \quad (2.12)$$

Où  $n_s$  et  $n_e$  représentent respectivement les concentrations à la sortie et à l'entrée de précipitateur.

$n$  peut être exprimé en nombre de particules ou en masse.

La performance initiale des électrofiltres peut, le plus souvent, décroître à cause de divers phénomènes apparaissant au cours du processus de filtration. Par conséquent, ces facteurs doivent être pris en compte lors de la conception et du fonctionnement d'un électrofiltre afin de pouvoir faire face à d'éventuels problèmes [38].

#### II.7.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre

L'efficacité de collecte d'un électrofiltre dépend de la résistivité apparente  $\rho_p$  des particules traitées. La mesure de  $\rho_p$  est donc importante pour une bonne estimation de l'efficacité de collecte.

La résistivité des particules dépend elle-même de la température du gaz porteur, de son taux d'humidité et de sa composition. La présence de SO<sub>3</sub> par exemple, diminue la résistivité [39]. L'effet de  $\rho_p$  sur l'efficacité de collecte est montré sur la figure (II.11) On y voit également les évolutions du courant et de la tension. Pour les valeurs de  $\rho_p$  comprises entre 10<sup>2</sup> et 5×10<sup>8</sup> Ωcm, un électrofiltre de type sec est dans les conditions optimales de fonctionnement [41]. Le phénomène de ré-entraînement des particules, à l'origine des faibles valeurs de rendement, survient lorsque  $\rho_p < 10^2$  Ωcm, tandis que le "back corona" conduit à une chute de l'efficacité de collecte lorsque  $\rho_p \geq 5 \times 10^8$  Ωcm.

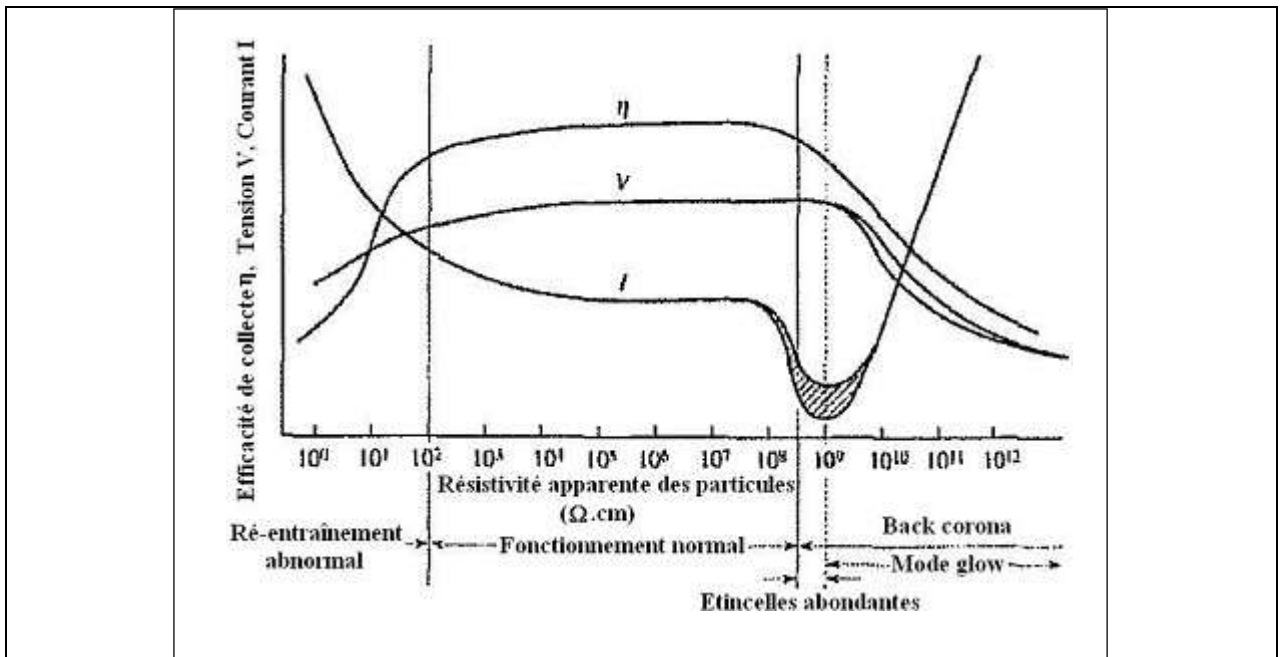


Figure II.10– Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte [24].

### II.7.2 Le ré-entraînement de particules

Le phénomène de réentraînement des particules consiste à la réintroduction des particules collectées dans l'espace inter-électrodes [43]. Dans un électrofiltre en fonctionnement normal, le réentraînement de particules survient pendant l'opération de frappage de l'électrode de collecte ou du fait de la vitesse élevée du gaz près de celle-ci. Lorsque la résistivité des particules devient inférieure à 10<sup>2</sup> Ωcm, l'adhésion est faible et une importante contre-émission se produit. Par conséquent, l'efficacité de collecte diminue. La figure (II.12) illustre le phénomène. En effet, les particules conductrices perdent leurs charges lorsqu'elles sont collectées, puis elles acquièrent des charges de

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

signe opposé par induction. Ces particules sont alors ramenées dans l'espace inter-électrodes par la

force due au champ électrique et sont à nouveau chargées par la décharge couronne. Elles font ainsi des sauts à la surface de l'électrode de collecte et parviennent à sortir de l'électrofiltre sans être captées. Le ré-entraînement peut être supprimé par les mesures suivantes [39] :

- l'injection d'agents adhésifs tels que l'ammoniaque, le sulfate d'ammonium ou les brunes d'huile ;
- l'utilisation de filtre de type humide ;
- le nettoyage périodique de l'électrode de collecte par frappage ou brossage [42].

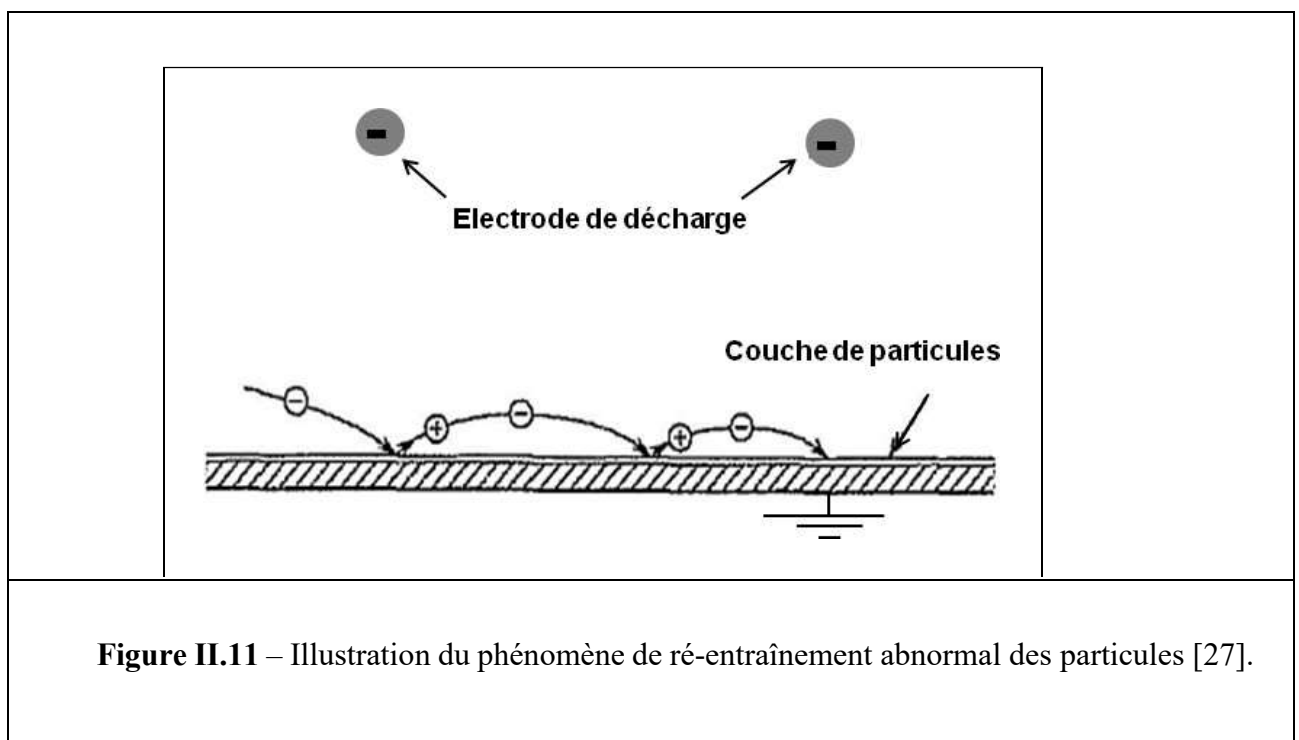


Figure II.11 – Illustration du phénomène de ré-entraînement anormal des particules [27].

### II.7.3 Le back corona

Le dépôt de particules sur l'électrode de collecte se comporte comme une couche diélectrique lorsque sa résistivité  $\rho_p$  dépasse une valeur seuil comparable à la valeur de la résistivité du gaz dans l'espace inter-électrodes. La tension à travers la couche de particules devient alors assez élevée pour causer localement des claquages, aux endroits les plus vulnérables de la couche. Les points de claquage émettent des ions de signe opposé vers l'électrode de décharge, ce qui dégrade l'efficacité de collecte. C'est ce phénomène qui est appelé back corona. C'est l'un des plus complexes au sein des électrofiltres [48-49]. Le back corona survient lorsque  $\rho_p \geq 5 \times 10^8 \Omega\text{cm}$  [50].

## Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols

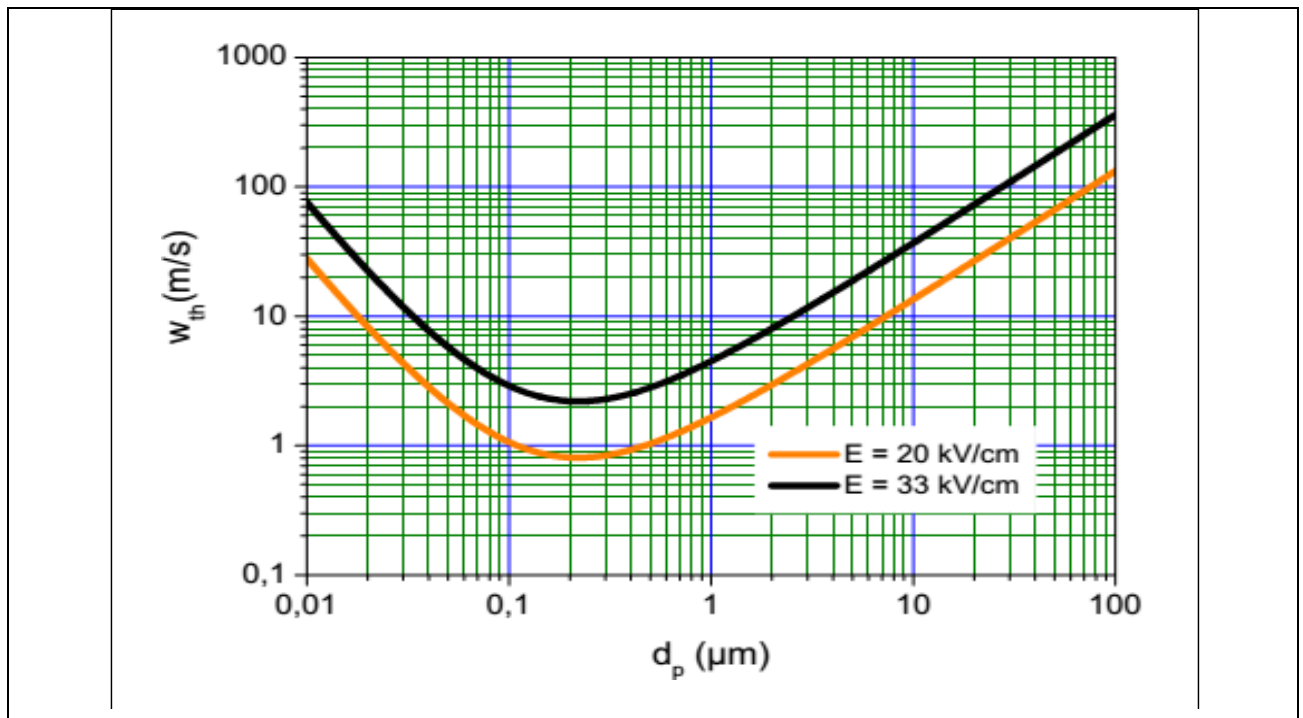
A l'intérieur de la couche de particules déposées sur l'électrode de collecte, un champ électrique  $E_p$  s'établit à cause du courant de décharge. Son expression est [44] :

$$E_p = \rho_p \times J_p \leq E_{pd} \quad (2.12)$$

Où  $J_p$  est la densité du courant de décharge (A/m<sup>2</sup>),  $E_{pd}$  le champ disruptif de la couche de particule (V/m).

### II.7.4 Influence de la taille des particules

Comme montre la figure (II.13), la vitesse de migration des particules  $w_{th}$  devient minimale pour les tailles de particules comprise entre 0,1 et 1  $\mu m$ , entraînant la diminution de la collecte des particules situées dans cette gamme de tailles. Par ailleurs, les grosses particules de taille supérieure à 10  $\mu m$  sont faciles à collecter mais, elles semblent les plus vulnérables au ré-entraînement lors des opérations de frappe [38].



**Figure II.12**– Variations de la vitesse de migration théorique en fonction de la taille des particules (libre parcours moyen des molécules du gaz  $\lambda_g = 0,065 \mu m$  et la viscosité dynamique du gaz  $\eta_g = 1,85 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ ).

### **II.7.5 L'extinction de la décharge par la charge d'espace**

Lorsque la taille des particules est très petite et la densité élevée, la charge d'espace formée par les particules chargées réduit la force du champ à la pointe de l'électrode de décharge. Il en résulte l'extinction de la décharge [39]. Parfois, la charge d'espace augmente la force du champ au niveau de l'électrode de collecte et entraîne la formation d'étincelles.

Les mesures pour y remédier sont entre autres, l'utilisation de dispositifs de pré-charge, de pré-filtres, d'électrofiltres montés en cascade [45,46] ou électrofiltre standard, dans lequel une petite quantité de vapeur d'eau est injectée au coeur de l'écoulement d'air. L'étude de ce dernier facteur de détérioration de l'efficacité de collecte est très instructive, ce qui permet d'augmenter significativement le rendement pour la collecte des particules. On se rend compte que lorsqu'elle est soumise à certaines conditions d'utilisation, la décharge peut être à l'origine de sa propre extinction. Il serait donc convenable de comprendre sa physique.

### **II.8 Applications de précipitateurs industriels**

Les applications importantes des précipitateurs électrostatiques dans les industries sont énumérées ci – dessous :

#### 1. Cimenteries

- a) Nettoyage des gaz d'échappement des fours de ciment ;
- b) Récupération des fines particules des fours ;

#### 2. Moulins à pulpe et à papier

- a) Récupération des fumées de soude dans les moulins à pulpe de Kraft ;

#### 3. Aciéries

- a) Nettoyage des gaz des hauts fourneaux afin de pouvoir les utiliser comme combustible ;
- b) Elimination des goudrons du gaz des fours à coke ;
- c) Nettoyage des gaz de foyers ouverts et des fourneaux électriques ;

## *Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols*

### 4. Industrie de métaux non ferreux

- a) Récupération des matières valorisables des gaz d'échappement ;
- b) Collecte de la brume acide ;

### 5. Industrie chimique

- a) Collecte des brumes d'acides sulfurique et phosphorique ;
- b) Nettoyage de divers types de gaz, tels que l'hydrogène, le CO<sub>2</sub> et le SO<sub>2</sub> ;
- c) Elimination des fines particules du phosphore élémentaire en état vaporeux ;

### 6. Industrie pétrolière

- a) Récupération des fines particules des catalyseurs ;

### 7. Industrie du carbone noir

- a) Agglomération et collecte du carbone noir ;

### 8. Centrales électriques

- a) Collecte des cendres volantes des chaudières chauffées à la houille.

## **II.9 Avantages des précipitateurs électrostatiques**

- Haut rendement de collecte ;
- Les particules aussi petites que 0,1  $\mu\text{m}$  peuvent être éliminées ;
- Faible coûts de maintenance et de fonctionnement ;
- Faible chute de pression (0,25 à 1,25  $\text{cm}$  d'eau) ;
- Manipulation satisfaisante d'un large volume de gaz à haute température ;
- Le temps de traitement est négligeable (0,1 – 10  $s$ ) ;
- Nettoyage facile en mettant hors service certaines unités du précipiteur ;
- Aucune restriction en ce qui concerne l'utilisation de produits chimiques solides, liquides ou corrosifs.

## **II.10 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques**

- Hauts coûts d'installation ;
- Haut besoin en espace, dû aux dimensions larges de l'équipement ;
- Risque d'explosions pendant la collecte de gaz combustibles ou de fines particules ;
- Pendant l'exploitation, des mesures de sécurité sont nécessaires. La distribution appropriée du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité de fines particules, et le taux d'ignition du corona doivent être maintenus avec soin ;
- Pendant l'ionisation du gaz, de l'ozone (gaz toxique) est produit par les électrodes de décharge à charge négative.

## **II.11 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique**

Lorsqu'il s'agit de choisir un système de précipitation électrostatique pour éliminer la pollution en suspension dans un courant gazeux, il est important de tenir compte des éléments suivants :

- **Caractéristiques des particules :**

- Dimension, formes réelles et densité des particules ;
- Propriétés physico-chimiques : adhésivité, hygroscopie, tendance à l'agglomération, fluidité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.

- **Caractéristiques du gaz porteur :**

- Température, pression et humidité ;
- Propriétés physique : densité, point de rosée des composés condensable viscosité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.

- **Caractéristiques du procédé :**

- Flux de gaz constant ou variable ;
- Débit volumique gazeux ;
- Concentration des particules ;
- Rendement de captation exigé ;
- Perte de charge permise ;

## *Chapitre II : Les précipitateurs Electrostatiques D'aérosols*

- Qualité exigée pour les produits.

- **Caractéristiques de fonctionnement :**

- Entretien et continuité du fonctionnement ;

- Sécurité et protection sanitaire ;

- Utilisation finale des substances recueillies.

### **II.12 Conclusion**

La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'air sur le plan technologique, il est acquis que l'utilisation des électrofiltres permet d'obtenir des résultats très satisfaisants en matière de filtration des poussières et des suies.

Les précipitateurs électrostatiques sont capables d'atteindre un rendement supérieur à 95% et même d'un rendement meilleur. Ils pourront donc satisfaire aux futures prescriptions légales imposant une teneur résiduelle en poussières encore plus faible. Le précipitateur électrostatique est un dépoussiéreur qui utilise les forces électriques pour séparer les vésicules du courant gazeux. La charge des particules résulte d'un phénomène appelé « l'effet couronne » qui apparaît lorsque nous appliquons une différence de potentiel entre deux conducteurs aux configurations géométriques appropriées.

Les modèles récents de précipitateurs utilisent un réseau de fils à effet de couronne suivi d'un groupe de plaques métalliques parallèles mises à la terre. Ces mêmes plaques sont fréquemment secouées afin de les débarrasser des poussières. Il existe également des versions plus petites à usage domestique. Au sein d'un précipitateur électrostatique, les mouvements et la précipitation des particules sont principalement influencés par le champ électrique, la charge d'espace, la vitesse d'écoulement du gaz, les caractéristiques physiques des particules et la configuration des électrodes. Pour ceci de nombreuses recherches ont été réalisées afin d'améliorer les performances des précipitateurs électrostatiques de telle sorte d'établir une collecte efficace des particules microniques et submicroniques.

Nous allons donc procéder au chapitre suivant à une étude expérimentale sur l'étude du rendement des filtres électrostatiques en fonction de différentes configurations géométriques des électrodes actives « en nappe de lames- deux plans ». Toutefois, les particules injectées seront de diamètre différent afin de pouvoir étudier l'impact du diamètre des poussières.

- [1] COMMISSION DE LA PRODUCTION ET DES ÉCHANGES, “La pollution de l’air”, Technical report, Rapport d’Information N°3088 de l’Assemblée Nationale, 23 Mai 2001, <http://www.assemblee-nationale.fr/rap-info/i3088.asp>, 2001. Commission de la production et des échanges. La pollution de l’air. Technical report, Rapport d’Information N°3088 de l’Assemblée Nationale, (2001), France, [www.assemblee-nationale.fr/rap-info/i3088.asp](http://www.assemblee-nationale.fr/rap-info/i3088.asp), (2001)
- [2] Hinds W. C, *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*. 2nd Edition, Wiley - Interscience, New York, 1999.
- [3] A.D. Kappos, P. Bruckmann, T. Eikmann, N. Englert, U. Heinrich, P. Höpfe, E. Koch, G. H. M. Krause, W. G. Kreyling, K. Rauchfuss, P. Rombout, V. S. Klemp, W. R. Thiel, H. E. Wichmann, “Health effects of particles in ambient air”, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 207, pp. 399-407, 2004.
- [4] I. M. Kennedy, “The health effects of combustion-generated aerosols”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 2757-2770, 2007.
- [5] C. S. Tang, L. T Chang, H. C. Lee, C. C. Chan, “Effects of personal particulate matter on peak expiratory flow rate of asthmatic children”, *Sci. Tot. Environ.* , Vol. 382, pp.43-51, 2007.
- [6] T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, New-York. (1995) pp. 10.
- [7] W.C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, 1999 (Wiley-Interscience).
- [8] S. Masuda and Y. Matsumoto, “Contact-type Electric Curtain for Electrodynamical Control of Charged Dust Particles”, *Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity*, Frankfurt, 1973, *Dechema-Monogr. No. 72, Nr. 1370-1409*, Verlag Chemie, 1974, pp. 293-301.
- [9] Zoltán Sternovsky, Amanda Sickafoose, Joshua Colwell, Scott Robertson and Mihály Horányi, “Contact charging of Lunar and Martian dust simulants”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. E11, p. 5105, 2002.
- [10] White H. J., “Industrial electrostatic precipitation”, Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
- [11] Parker K. R., “Electrostatic precipitation”, Chapman & Hall, pp. 1-24, 1997.
- [12] Oglesby S. & Nichols G. B., “Electrostatic precipitation”, Marcel Dekker Inc., 1978
- [13] Pauthenier M. & Moreau-Hanot M., “La charge des particules sphériques dans un

- champ ionisé”, *Journal de Physique et le Radium*, 3, pp. 590-613, 1932
- [14] Pauthenier M. & Guillien R., “Etude électromécanique de la charge limite d’une sphère conductrice dans un champ électrique ionisé”, *C. R. A. S. Paris*, 195, pp. 115-116, 1932.
- [15] Liu B. H. Y. & Pui D. H. Y., “On unipolar diffusion charging of aerosol in the continuum regime”, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 58, (1), pp. 142-149, 1977.
- [16] Brock J. R., Wu M., “Field charging of aerosol particles”, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 45, pp. 106-114, 1973.
- [17] Brock J. R., “Non continuum unipolar charging of aerosol: the role of external electric field”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 41, N° 5, pp. 1940-1944, 1970.
- [18] McDonald J. R., Smith W. B. & Spencer H. W., “A mathematical model for calculating electric conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 48, N° 6, pp. 2231-2243, 1978.
- [19] S. K. Friedlander, “Smoke, Dust and Haze”, 2nd Edition, 2000 (Oxford University Press Inc., USA).
- [20] P. A. Lawless & R.F. Altman, “ESPM: an advanced electrostatic precipitator model”, *IEEE Ind. Appl. Conf. 29th IAS Annual Meeting Denver*, pp. 1519-1526, 2-5 Oct., 1994.
- [21] W. B. Smith & J. R. McDonald, “Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions”, *Journal Aerosol Science*, Vol. 7, pp. 151-166, 1976.
- [22] R. A. Fjeld & A. R. McFarland, “Evaluation of select approximations for calculating particle charging rates in the continuum regime”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 10, pp. 535-549, 1989.
- [23] R. A. Fjeld & D. Wu, “Evaluation of continuum regime theories for bipolar charging of particles in the 0.3  $\mu\text{m}$  – 13  $\mu\text{m}$  diameter size range”, *IEEE, Trans. on Ind. App.*, Vol. 26(3), pp. 523-527, 1990.
- [24] G. W. Hewitt, “The charging of small particles for electrostatic precipitators”, *AIEE Transactions*, Vol. 76, pp. 300-306, 1957.
- [25] Cochet R., *Lois de charge des fines particules (submicroniques). Etudes théoriques – Contrôles récents. Spectres de particule. Colloque Intern. n° 102 : “La physique des forces électrostatiques et leurs applications”*, pp. 331-338, CNRS, Paris, 1961.
- [26] Felici N., “Diélectriques”, *Institut Polytechnique, Grenoble, 1966.* « Principaux procédés de filtration des gaz ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/documents/61353-principaux-procedes-de->

- filtration-des-gaz.pdf. [Consulté le: 22-juill-2016].
- [27] J. Vehlow, « Air pollution control systems in WtE units: An overview », *Waste Manag.*, vol. 37, p. 58-74, mars 2015.
- [28] W. Peukert et C. Wadenpohl, « Industrial separation of fine particles with difficult dust properties », *Powder Technol.*, vol. 118, no 1–2, p. 136-148, août 2001.
- [29] H. J. White, *Industrial electrostatic precipitation*. Addison-Wesley, 1965. A. Jaworek, A. Krupa, et T. Czech, « Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review », *J. Electrostat.*, vol. 65, no 3, p. 133-155, mars 2007.
- [30] Z. Al-Hamouz et A. El-Hamouz, « Analysis of a wire–duct electrostatic precipitator under dust loading conditions », *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no 2, p. 1235-1243, févr. 2011.
- [31] G. Leonard, M. Mitchner, et S. A. Self, « Particle transport in electrostatic precipitators », *Atmospheric Environ.* 1967, vol. 14, no 11, p. 1289-1299, 1980.
- [32] « Dry type Electrostatic precipitator: Fixed-electrode type : Hitachi Infrastructure Systems (Asia) Pte. Ltd. » [En ligne]. Disponible sur: [http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/dustcollection/dry\\_type/index.html](http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/dustcollection/dry_type/index.html). [Consulté le: 28-juill-2016].
- [33] S. A. Jaasund, « Control of fine particle emissions with wet electrostatic precipitation », *Environ. Int.*, vol. 6, no 1–6, p. 233-238, 1981.
- [34] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatic*, 70 (2012) pp. 20-24.
- [35] W. Deutsch, "Bewegung und ladung der elektrizitatstrager im zylinderkondensator," *Annals of Physics*, vol. 68, pp. 335–344, 1922.
- [36] S. Oglesby and G.B. Nichols, *Electrostatic Precipitation*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1978.
- [37] J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [38] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, pp. 615-624, 2000.
- [39] R. Boichot, *Filtration des particules issues des moteurs diesel par matrices fibreuses plongées dans un champ électrique*. Chambéry, France: Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 2005.
- [40] N. Tachibana and H. Fujishima, "Application of electrostatic precipitation with

- intermittent energization," in Proc. International Conference on Modern Electrostatics, 1988.
- [41] S. Masuda and J. D. Moon, "High intensity charging device for carbon soot particles," in Proc. 2nd International Conference on Electrostatic Precipitation, 1984.
- [42] T. Yamamoto, M. Mieno, K. Shibata, and K. Sakai, "Studies on rapping reentrainment from electrostatic precipitators," in Proc. 7th International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP, 1998, pp. 163–170.
- [43] S. Masuda and A. Mizuno, "Light measurement of back discharge," Journal of Electrostatics, vol. 2, pp. 375-396, 1977.
- [44] S. Masuda and A. Mizuno, "Flashover measurement of back discharge," Journal of Electrostatics, vol. 4, p. 215, 1978.
- [45] S. Masuda, T. Itagaki, and J. Z. Wang, "Role of dust space charge in electrostatic precipitation and its measuring method," in Proc. 3rd International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP, 1987, p. 519.
- [46] I.E.Japan. Handbook of Electrostatics. Ohm-Publishing Co., 1998.
- [47] S. Masuda and A. Mizuno. Light measurement of back discharge. Journal of Electrostatics, Vol. 2 (1976) pp. 375.
- [48] S. Masuda. Resistivity and back corona. In Proc. International Conference on Electrostatic Precipitation, Monterey, California, (1981) pp. 131–161.
- [49] G. W. Penny. Electrostatic precipitation of high resistivity dust. AIEE Trans. Journal, Vol. 70 (1951) pp. 1192.
- [50] Pang H. (2006) dépoussiérage électrostatique pour les particules en atmosphère usuelle (Terre) et raréfiée (planète mars). Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble1, France.

# *Chapitre III*

## *Étude expérimentale*

*De l'efficacité de collecte de trois  
configurations de précipitateur  
électrostatique à lames-plans*

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

### III.1 Introduction

Au fil des dernières années, avec la croissance de l'industrie, la pollution par les particules est devenue un véritable danger pour L'écosystème naturel et la santé des individus. La pollution de l'air représente un défi majeur et nécessite une gestion appropriée (Parera 2022). Le marché propose différents systèmes de dépollution de l'air, comme le précipitateur électrostatique (ESP) (Parker 2007 ; Xu et al. 2016). Pour réduire les fumées, les émanations et la poussière, des filtres électrostatiques sont employés pour éliminer les particules de l'air ambiant. Les précipitateurs électrostatiques utilisés dans l'industrie pour éliminer les gaz de combustion par décharge corona sont couramment employés. Les électrofiltres jouent un rôle crucial dans la préservation d'un environnement sain et dans l'amélioration de la qualité de l'air (Sparks et Chase 2016 ; Chang 2003 ; Arif et al. 2021).

L'électrode collectrice est généralement mise à la terre, tandis que l'électrode de décharge est reliée à l'alimentation électrique à haute tension. Les molécules de gaz sont ionisées par le champ électrique puissant qui entoure l'électrode de décharge, connue sous le nom de décharge corona (Nouri et al. 2016). Ensuite, les ions se déplacent vers l'électrode collectrice en suivant les lignes de champ électrique. Par diffusion ou par un processus de charge de champ, ils peuvent s'accrocher à la surface des particules de poussière en suspension lorsqu'elles se fixent à l'électrode de collecte (Gongming, Qiang et Qiang 2018).

Le bombardement de la surface de la particule de poussière par des ions qui se déplacent sous l'effet du champ électrique provoque une charge du champ. Selon les principes de la théorie cinétique des gaz, les ions adhèrent à la surface de la particule de poussière en se dispersant, ce qui provoque une charge de diffusion. Ensuite, la force électrique fournie alors fera que les particules chargées se déplacent en direction de l'électrode de collecte (Zheng et al. 2018). Elles transmettront leur charge à l'électrode de collecte et créeront une couche de poussière, qui sera ensuite retirée plus loin dans la trémie par certaines méthodes de dépoussiérage (Teng et Li 2021 ; Atten, Mccluskey et Lahjomri 1987 ; De Oliveira et Guerra 2021).

De nombreuses études expérimentales ont été rapportées, l'accent étant mis sur l'étude de l'impact de l'électrostatique sur l'efficacité de la collecte des particules dans les ESP. Les ESP typiques sont composés d'électrodes de décharge à haute tension et d'électrodes de

## **Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans**

collecte mises à la terre (Jaworek et al. 2019 ; Feng et al. 2018a). Pendant le fonctionnement de l'ESP, la décharge corona génère des ions et les particules sont chargées en entrant en collision avec les ions. La force de Coulomb facilite la collecte des particules chargées.

Cet chapitre vise principalement à examiner l'impact des caractéristiques électriques des particules dans un assemblage à électrodes multiples, ainsi que les performances prévues de trois différentes topologies d'électrodes, à savoir lame de scie et lame. L'amplitude de la tension appliquée et la polarité sont deux des nombreux éléments pris en considération. Les propriétés du courant-tension et l'efficacité de collecte sont étudiées et discutées. Diverses électrodes de formes, de diamètres et d'espacements différents ont été utilisées dans l'expérience.

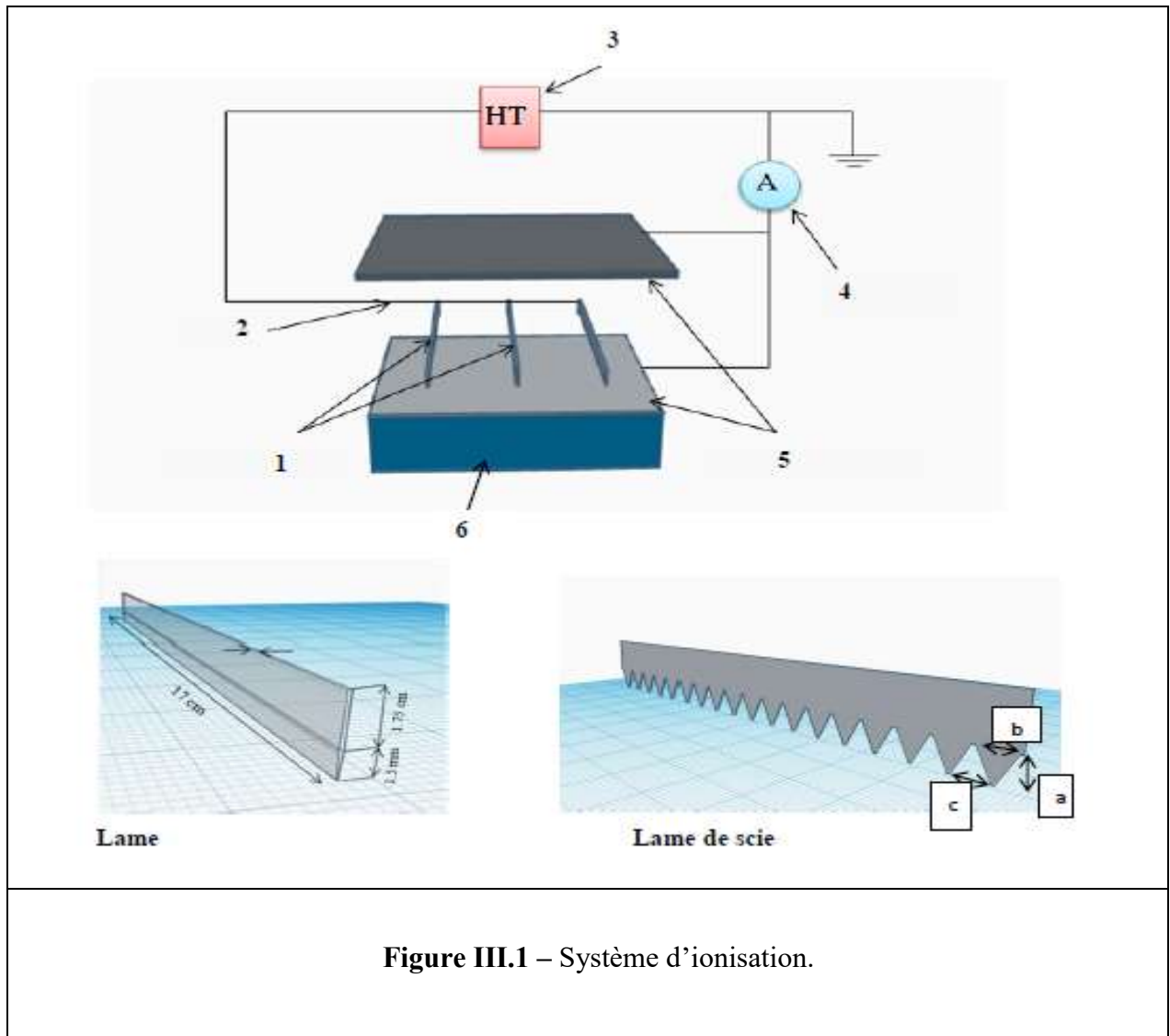
### **III.2 Description du dispositif expérimental**

La figure (III.1) montre la représentation schématique de l'ESP. L'étage unique de l'ESP utilisé dans cette étude se compose de deux électrodes parallèles connectées à la terre par l'intermédiaire d'un microampèremètre, il est fabriqué dans des plans rectangulaires en acier inoxydable de 220 mm de long, 170 mm de large et 2 mm d'épaisseur, et de cinq électrodes haute tension où le choix de la géométrie est basé sur trois topologies différentes « lame, lame de scie 1 et lame de scie 2 ».

Les électrodes étaient parallèles à la plaque. Les principales dimensions de précipitateur électrostatique sont présentées dans le tableau 1, comme la distance entre deux électrodes actives successives est maintenues à 20 mm et la distance entre l'électrode active et l'électrode passive est de 50 mm.

Le dispositif expérimental est illustré à la figure III.2. Le système se compose d'un ESP de laboratoire, d'une soufflerie d'air, d'un chargeur de particules, d'une alimentation électrique à haute tension et d'un système de mesure électrique. À partir du système d'air créé par la soufflerie, de l'air sec est introduit dans le tunnel, mélangé à de la poussière, qui est ensuite introduite dans l'ESP. Le laboratoire de recherche permet de visualiser les trajectoires des particules de poussière sur la caractéristique I-V et de déterminer leur vitesse dans les espaces inter-électrodes pour chaque type de configuration afin de déterminer l'ESP le plus performant et le plus efficace.

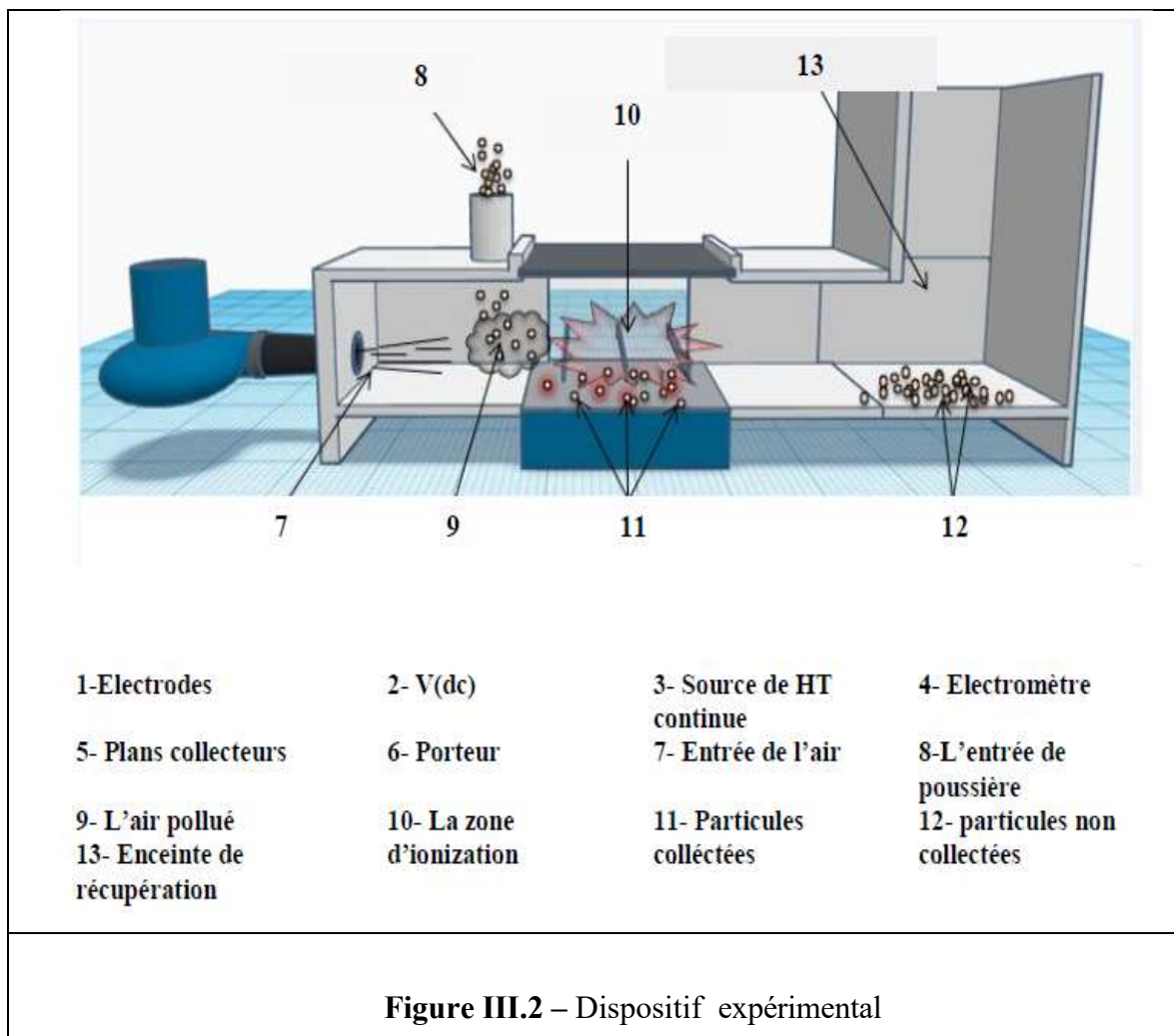
### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans



En assemblant deux systèmes « Ionisation, Injection », il est possible de créer un prototype qui permet de filtrer l'air pollué injecté à l'entrée. Le système d'ionisation est constitué de lames à faible rayon de courbure installées entre deux plans avec des supports isolants en plexiglas. Ce procédé permet de générer un champ magnétique. Après avoir été alimentées par une source de tension continue haute de 0 à 80 kV, ces lames sont appelées électrodes actives ou également électrodes émettrices. Ce phénomène définit l'effet couronne. En effet, la poussière entre dans l'espace entre les électrodes, provoquant ainsi une ionisation du gaz autour de la lame, ce qui entraîne la formation d'ions et d'électrons. Les molécules de poussière qui se transforment en électricité seront bombardées par ces particules micro-niques, qui seront dérivées vers la surface des plaques sous l'effet du

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

champ électrique. De plus, la non-collecte de poussière sera récupérée dans une enceinte de récupération.



### III.3 Méthode de mesure

#### III.3.1 Mesure de la tension appliquée

Dans cette étude, on utilise les polarités positives et négatives de la haute tension continue. La tension continue est fournie par deux blocs d'alimentation (série LT, de Glassman High Voltage, Inc, 30 mA, 80 kV), un pour chaque polarité. Une tension continue (DC) positive ou négative est fournie aux électrodes corona par une source allant de 0 à 80 kV. Par la suite, on applique un micro-ampèremètre (électromètre Keithley 6514) sur l'électrode de plaque afin de mesurer le courant moyen. Pendant les expériences,

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

l'électromètre utilisé est un électromètre numérique de la marque Keithley, modèle 6514 (voir figure III.3).



Figure III.3 :.Electromètre numérique Keithley, modèle 6514



Figure III.4 Source de H aute Tension modèle Glassman, séries LT [1].

#### III.3.2 Mesure de la masse des particules :

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans



Les particules sont soumises à une charge électrique et recueillies sur l'électrode plane. Afin de déterminer l'efficacité de collecte de l'ESP, on évalue la concentration de particules à la sortie de l'ESP utilisant une balance de précision (KERN-PLS, 4200-2 F, avec un poids maximal de 4,2 kg). Une balance électronique Kern 440-47N (voir figure III.4) a été employée, pour mesurer la quantité de poussière qui sera injectée dans le filtre, ainsi que la poussière récupérée à la sortie, sa capacité de pesée Max : 2100 g. Lecture d : 0.01

### III.3.3 Mesure de la vitesse du vent appliqué

Les anémomètres à hélice sont des appareils de mesure du vent classiques désormais volontiers utilisés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Leur manipulation aisée permet de mesurer la vitesse du vent ou de l'air possible en minimum de temps, sa gamme de mesure : 0.3...20 m/s, avec précision :  $\pm 0.1$  m/s ou  $\pm 1.5$  % vm.

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans



**Figure III.6 :** Anémomètre avec sonde à hélice intégrée testo 417 [2]

#### III.3.3.1 Mesure des conditions atmosphériques :

Les tests ont été réalisés dans des conditions environnementales stables : (température de l'air à 20-25°C, pression comprise entre 725 et 760 Torr, humidité relative RH% 40-50%). Ces mesures sont établies par un appareil compact pour la mesure de l'Humidité relative et de la Température. Le capteur est mobile (Wireless) il peut être déporté de l'appareil en insérant un cordon de liaison intermédiaire. L'humidité et la température.



**Figure III.7:** Thermo-hygromètre Testo 625 [3].

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

### II.3.3.3 La régulation de la vitesse du vent appliqué :

L'autotransformateur nous permet de réguler la vitesse du souffleur en variant la valeur de sa tension. La variation de la vitesse d'écoulement  $v$  est obtenue en modifiant la tension d'alimentation du ventilateur ( $V_{al}$ ).



Figure III.8 : Autotransformateur

### ➤ Souffleur aspirateur électrique



Figure III.8 : Souffleur aspirateur électrique

L'air entrant le long de l'axe  $x$  et dépourvu de particules est entraîné par une soufflerie dont la vitesse est régulée. Celui-ci on connecte cette soufflerie à une source de courant

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

alternatif basse tension et on mesure la vitesse à l'aide d'un anémomètre (Testo 417, 0,3-20 m/s) installé à l'entrée du précipitateur électrostatique. Effectivement, le système d'étalonnage maintient la vitesse à 1,8 m/s en ajustant la tension d'alimentation (U) de la soufflerie en fonction de la vitesse (v) de la soufflerie. L'outil suivant est utilisé pour créer un flux d'air et souffler la poussière Pression d'air 560mm, volume d'air 2.8m / min, puissance 600W 220V-50/60Hz.

#### III.3.3.3 Analyse chimique des particules injectées :

##### ➤ Caractéristique des particules injectées

Dans le cadre de l'expérience, trois catégories de particules de poussière ont été analysées à l'aide de la fluorescence X (XRF). On a recueilli les particules de poussière dans une cimenterie.

Chemical composition (ppm)								
	Dust A (5 µm)		Dust B (10 µm)		Dust C (45 µm)			
SiO <sub>2</sub>	862	624	Ca	519	364	SiO <sub>2</sub>	385	831
Fe	11	157	Al	24	788	Al	114	090
Al	6	024	SiO <sub>2</sub>	24	010	Fe	35	910
Ca	2	644	Fe	2	049	Ti	2	481
Mn	875		Cl	897		Ba	2	411
Ag	358		Ag	358		Ca	2	196
Cl	244		Mo	315		Cl	882	
Zn	120		Mn	177		V	762	
Sr	94		Zn	142		Pb	587	
Mo	91		Cr	63		Ag	358	
Cr	85		Pb	27		Mn	304	
Ba	10					Zn	244	
Pb	81					Mo	157	
						Cr	96	
						Sr	90	

**Tableau III.1** : La caractérisation chimique de différentes particules de poussière.

Grâce à ses différentes options de mesure et à sa sensibilité multi-éléments, l'analyseur XRF offre la possibilité d'effectuer des analyses de haute qualité sur des échantillons miniers et minéraux, Étudier la composition chimique des sols, des sédiments, des minerais, de sols, de mudrock, de carottes de forage, de concentrés, Analyser les éléments clés, les

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

traces et les éléments tels que l'uranium, Collecter des informations basiques en temps réel. Selon le tableau III.1, les trois éléments de poussière présentent des compositions chimiques riches en  $\text{SiO}_2$ , Al et Fe.



**Figure III.9 :** Analyseur XRF portable de table pour l'analyse élémentaire

#### III.4 Résultats expérimentaux

Les essais expérimentaux sont réalisés pour analyser l'étude comparative entre les trois géométries des électrodes, afin d'obtenir le modèle le plus efficace du précipitateur électrostatique, en tenant compte de l'influence des paramètres internes par la mesure de le courant de décharge corona. A cet effet, la variation de la vitesse du vent (au moyen d'un autotransformateur et d'une soufflerie à l'entrée du dispositif, **figure III.2**) facilite le choix de la valeur optimale du flux d'air pour le placement aérodynamique des particules. En outre, la distance entre les électrodes et le collecteur est  $H = 50 \text{ mm}$ . Par conséquent, les instructions suivantes sont prises en compte pour les caractéristiques du courant-tension dans différentes valeurs de la vitesse du vent :

- La tension appliquée en deux polarités positive et négative ;
- La variation de la vitesse du vent variée par le biais de l'autotransformateur ;
- Les trois topographies de différente géométrie des électrodes actives ;
- La variation de diamètre des particules injectées.

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

### III.4.1 Effet de la vitesse de migration des particules sur la caractéristique I(V)

En général, les mécanismes de charge des particules considérés comme pertinents dans la précipitation électrostatique sont [1] la charge de champ, également appelée charge d'impact ou bombardement ionique, où les particules sont bombardées par des ions se déplaçant sous l'effet du champ électrique appliqué, et [2] la charge de diffusion, où les particules sont chargées suite au mouvement des ions générés par le mouvement thermique des molécules de gaz environnantes. Les particules de plus de 0,5 µm sont principalement chargées par champ, tandis que les particules de moins de 0,1 µm sont chargées par diffusion.

Cependant, les deux mécanismes sont importants dans la gamme de tailles 0,1-0,5 µm. La charge maximale acquise par une particule est (Parker 2007 ; Chang 2003) :

$$q_{max} = 4. \pi. \epsilon_0. a^2. E \quad (1)$$

Où  $\epsilon_0$  est la permittivité absolue de l'espace libre ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m),  $P$  est la pression,  $a$  le rayon de la particule et  $E$  la force électrique du champ de charge.

La vitesse d'une particule chargée est contrôlée par la dynamique du système de forces qui s'exerce sur elle. Il existe une différence avec les forces agissant dans le système de précipitation, y compris les forces gravitationnelles, inertielles, visqueuses, et les forces électriques. Les forces gravitationnelles sont relativement négligeables et peuvent donc être ignorées pour les particules fines qui sont importantes dans la précipitation électrostatique. Elle résulte de la moyenne des forces de traînée des forces visqueuses et électrostatiques. Pour les particules chargées par bombardement ionique, la vitesse de migration est donnée par (Pauthenier et Moreau-Hanot 1934) :

$$w = \frac{2. \pi. \epsilon_0. P. a. E_c. E_p}{3} \quad (2)$$

Où  $E_c$  est le champ de charge et  $E_p$  le champ de collecte sont presque égaux pour les précipitateurs à un étage et  $\mu$  est la viscosité du gaz. Il est donc possible de conclure que la vitesse de migration est liée aux zones d'évacuation et de collecte ainsi qu'au rayon de particules. La viscosité du gaz est inversement liée aux champs de décharge et de collecte, ainsi qu'au rayon des particules  $a$ .

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

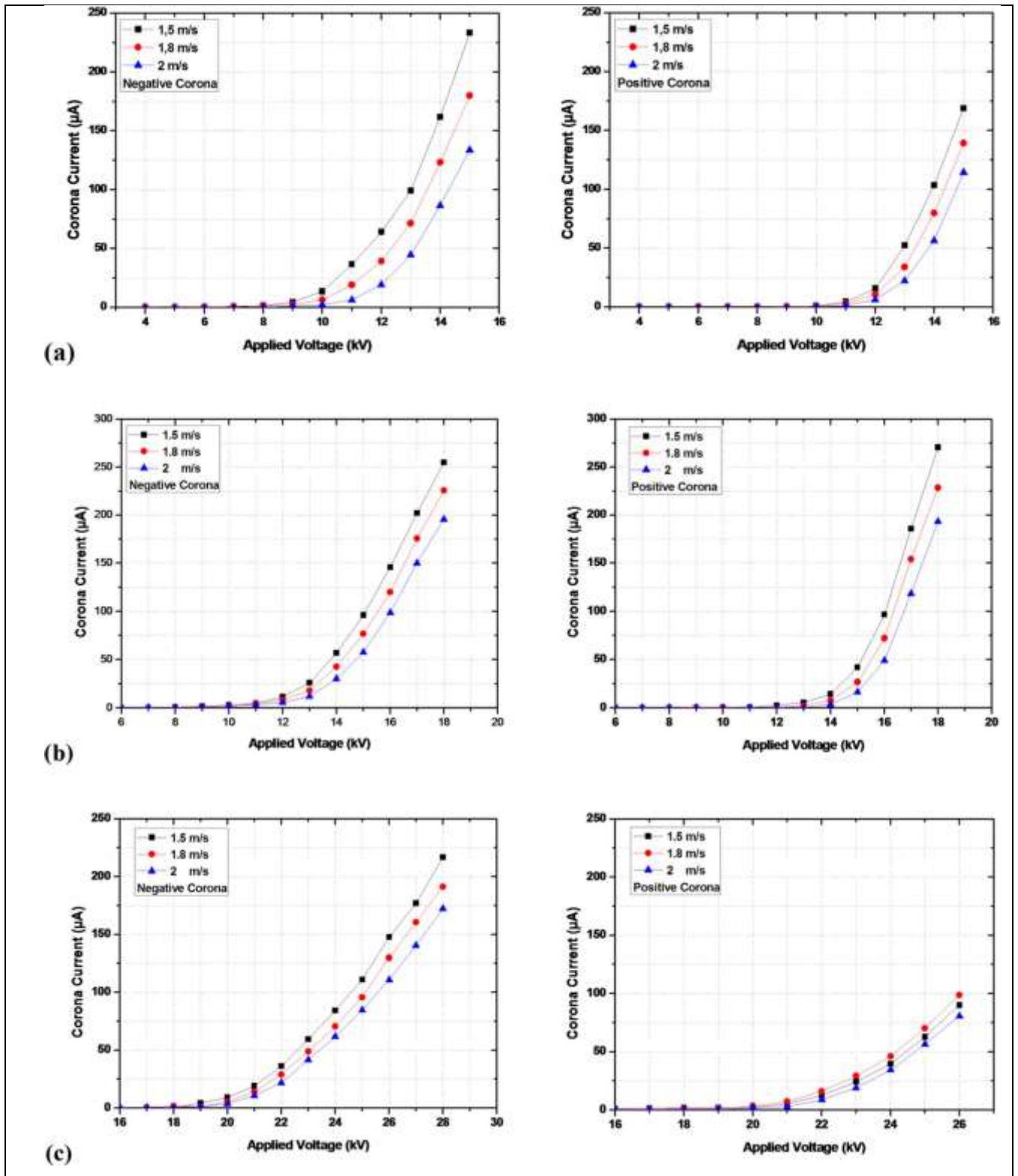


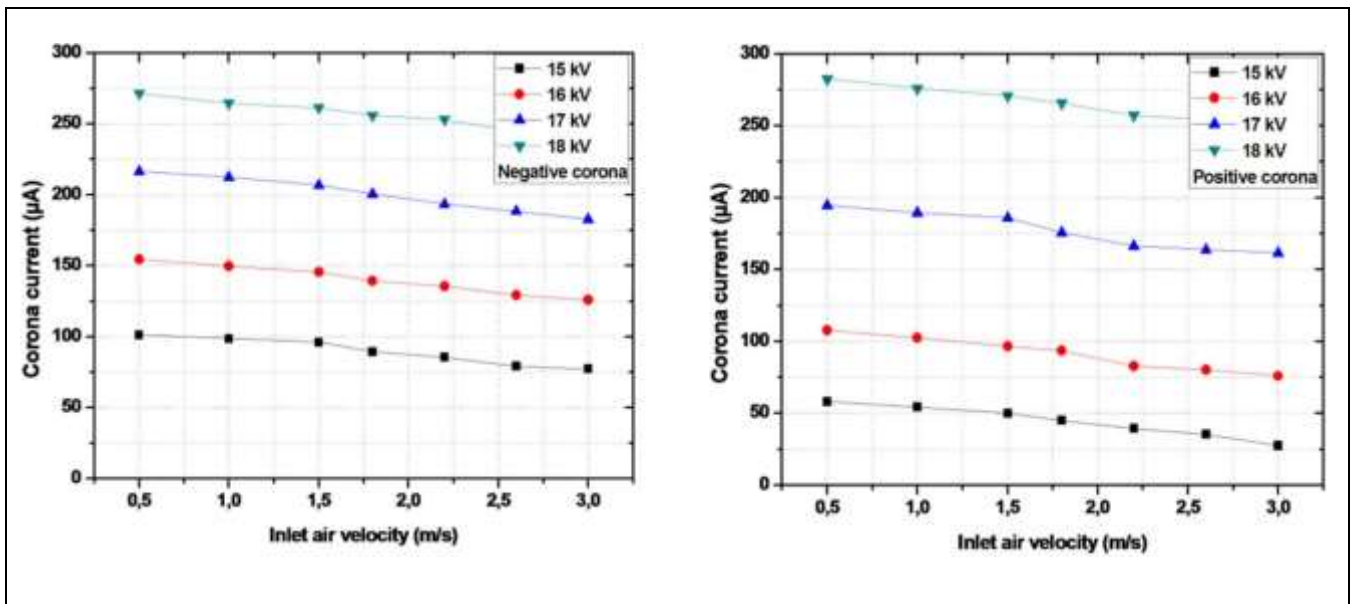
Figure III.10- effet de la vitesse sur les caractéristiques courant-tension ; (a) grande lame de scie, (b) petite lame de scie et (c) lame.

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

Si une particule est collectée à l'électrode passive elle doit parcourir une distance spécifique  $d$  à partir de l'électrode de décharge. La vitesse de l'air  $v$  et la vitesse des particules sont donc dans la même direction.

À l'inverse, la vitesse de migration  $w$  se traduira par la vitesse transversale, la vitesse transversale entre l'électrode de décharge et l'électrode de collecte. Afin de garantir une collecte efficace de 100 %, il est nécessaire que la particule se déplace vers l'électrode de collecte en un temps  $t' = d/w$ , et la longueur du conduit est calculée en fonction de :

$$L = t' = \left(\frac{d}{w}\right) \quad (3)$$



**Figure III.11-** Courant corona au collecteur ESP en fonction de la vitesse du flux d'air d'admission pour différentes tensions corona appliquées pour les deux polarités.

Trois valeurs sont définies pour la vitesse de l'air : 1,5 m/s, 1,8 m/s et 2 m/s, comme indiqué dans la figure III.11 pour les polarités positives et négatives. Quoiqu'il en soit des différentes topologies d'électrodes actives, il est évident qu'une tension minimale est requise pour générer un courant. Le début de cette tension est provoqué par l'ionisation de l'électrode corona, d'une part, et la vitesse du flux de gaz, d'autre part, qui peut également influencer l'efficacité de la précipitation. On considère que la diminution de la vitesse d'entrée du gaz accroît l'efficacité globale de la précipitation. Effectivement, une hausse de la vitesse d'écoulement entraîne une diminution du temps de chargement des particules. Les

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

vitesse d'écoulement des gaz supérieures à la limite actuelle d'environ 1,5 m/s entraîneront une réduction substantielle des performances de précipitation. La migration des particules par le flux électro-hydrodynamique généré par la décharge couronne est influencée par la vitesse du flux d'air à travers l'ESP, ce qui entraîne des modifications dans les distributions de la densité de courant et du champ électrique (Nouri et al. 2017 ; Ait Said, Nouri et Zebboudj 2015 ; Nouri et Zebboudj 2010). Effectivement, la vitesse d'écoulement de l'air  $v$  diminue de manière linéaire avec le courant de décharge collecté au niveau du collecteur à plaque, comme illustré dans la **figure III.11**. L'explication de ce comportement de la couronne réside dans l'interaction entre la décharge couronne et le flux d'air primaire dans l'ESP, créant ainsi un flux secondaire électro-hydrodynamique.

### III.4.2 Mesure de la caractéristique courant-tension des particules injectées

#### III.4.3 Effet du diamètre des particules sur la caractéristique I(V)

Townsend a proposé une loi qui porte son nom, portant sur le courant et la tension pour la décharge corona dans un fil cylindrique coaxial (Townsend 1915). Les propriétés I-V de la décharge couronne respectent la loi quadratique de Townsend pour une variété étendue de tensions appliquées. D'après cette loi, le courant couronne fluctue en fonction de la tension appliquée de la façon suivante :

$$I = K.V.(V - V_0) \quad (4)$$

Où  $I$  est le courant de décharge corona,  $V$  est la tension fournie,  $V_0$  est la tension d'amorçage corona et  $K$  est une constante dimensionnelle dépendant de la distance inter-électrodes, du rayon du fil-électrode, de la mobilité des porteurs de charge dans la zone de dérive, de l'humidité de l'air et d'autres facteurs géométriques. Une autre particularité essentielle de l'équation (4) réside dans le fait que la tension d'amorçage de l'effet couronne est reflétée dans les équations. Les droites d'ajustement à l'axe de tension sont extrapolées pour déterminer la tension d'amorçage corona  $V_0$ . Il est important que la tension extrapolée soit toujours physiquement positionnée sur le côté droit de l'ordonnée et ait la même polarité que l'effet couronne. Selon l'équation (4), on peut formuler :

(5)

Dans ce cas, la relation entre le courant couronne I et la variation de tension ( $V - V_0$ ) peut être analysée. On peut calculer expérimentalement le facteur K pour un effet couronne positif et négatif en ajustant une courbe en fonction de la variation de tension en ajustant le rapport courant/tension I/V. Le rapport  $K-/K+= \mu-/ \mu+$  est  $\approx 1,085$ .  $\mu-$  représente la mobilité de l'ion négatif ( $m^2/V.s$ ) et  $\mu+$  représente la mobilité de l'ion positif ( $m^2/V.s$ ) (Aissou et al. 2015 ; Ait Said et al. 2019 ; Ait Said et al. 2022). La figure 5 montre les caractéristiques courant-tension de l'ESP pour les deux polarités de haute tension, avec et sans présence de particules. La décharge corona est typiquement caractérisée par la relation courant-tension. Comme prévu, quand la tension appliquée dépasse la tension d'amorçage corona, le courant de décharge augmente progressivement en fonction de la tension appliquée. En utilisant la même tension, le courant de décharge diminue en fonction de la présence et de l'augmentation du diamètre des particules, ce qui entraîne une augmentation du courant de décharge avec la polarité négative. Cela résulte de la disparité entre la mobilité apparente des porteurs de charge négatifs et celle des porteurs de charge positifs.

#### **III.4.4 Effet du diamètre des particules sur l'efficacité de collecte**

La collecte d'un système de filtration destiné à éliminer les particules de ciment est influencée par la polarité, le nombre de décharges des électrodes, le diamètre des particules, la vitesse du vent, la température et l'humidité du gaz. L'efficacité de collecte de la masse d'un précipitateur électrostatique est ce qui détermine sa performance :

$$(\%) = \left[ 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \right] \cdot 100\% \quad (6)$$

Où mout et min sont les concentrations massiques totales d'une taille de particule spécifique en aval et en amont de l'ESP avec la tension appliquée, respectivement.

L'efficacité de collecte a évolué en fonction de la tension appliquée pour les trois électrodes de forme différente, comme le montre la figure III.12. L'efficacité de collecte augmente considérablement avec la taille des particules pour les deux polarités, peu importe la tension appliquée. Cela s'explique par le fait que la charge des particules est proportionnelle au diamètre des particules et que, par conséquent, les particules plus grandes atteignent une charge supérieure à celle des particules plus petites et sont plus attirées par les plaques collectrices. L'effet est encore plus accentué lorsque les tensions de décharge diminuent, ce

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Effacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

qui entraîne des courants corona plus faibles.

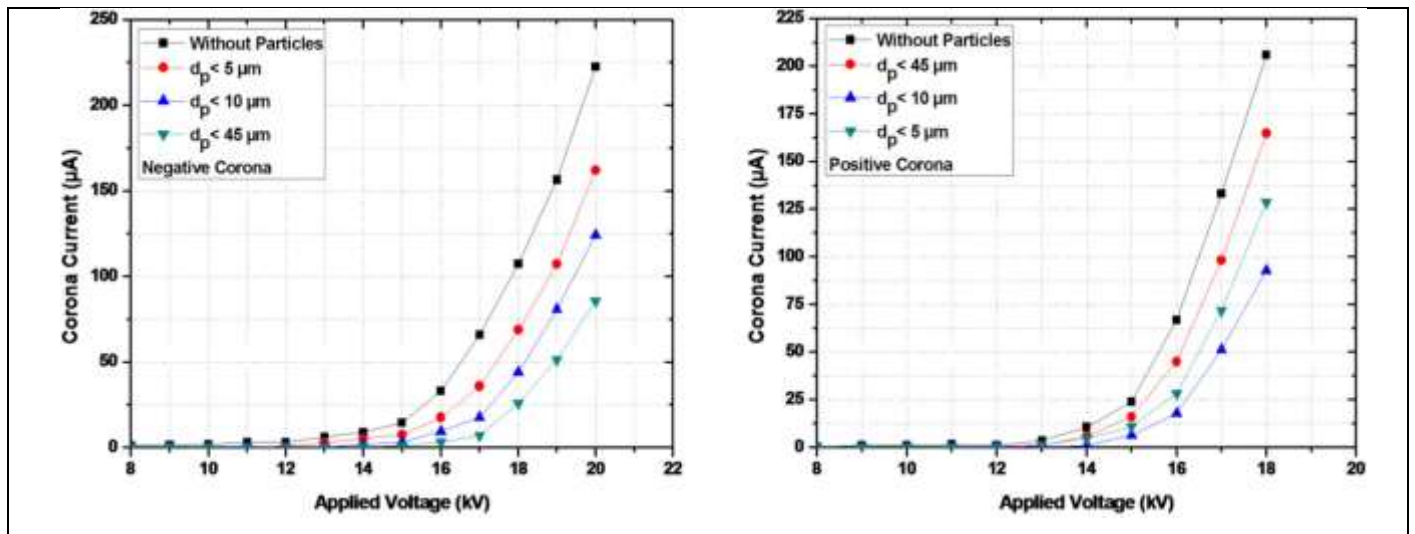


Figure III.12- courant corona en fonction de la tension appliquée avec et sans particules pour la lame de scie 1 pour les deux polarités.

### III.4.5 Effet de la géométrie de l'électrode sur l'efficacité de collecte des particules

### III.4.6 Effet de la forme de l'électrode sur l'efficacité de collecte des particules

On a étudié l'efficacité de l'élimination et de la migration des particules à l'aide de trois topologies d'électrodes de décharge dans trois catégories de diamètre différentes. Selon la figure III.13, on peut observer comment la collecte d'électrodes de différentes formes est efficace en fonction de la tension appliquée pour une taille de particule  $d_p$  inférieure à  $10 \mu\text{m}$  dans les deux polarités. La scie miniature Le courant corona généré par l'électrode « lame de scie 2 » a été augmenté même avec la même tension appliquée. En particulier, l'efficacité de collecte augmentera, ce qui suggère une optimisation de la géométrie de l'électrode de décharge pour un ESP. Comme illustré par la figure 6, l'efficacité de l'élimination des particules augmente lorsque la tension spécifique appliquée pour les particules augmente. Le courant corona spécifique de l'électrode à lame a été inférieur à celui des électrodes à grande et petite lame, appelées "lame de scie 2".

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

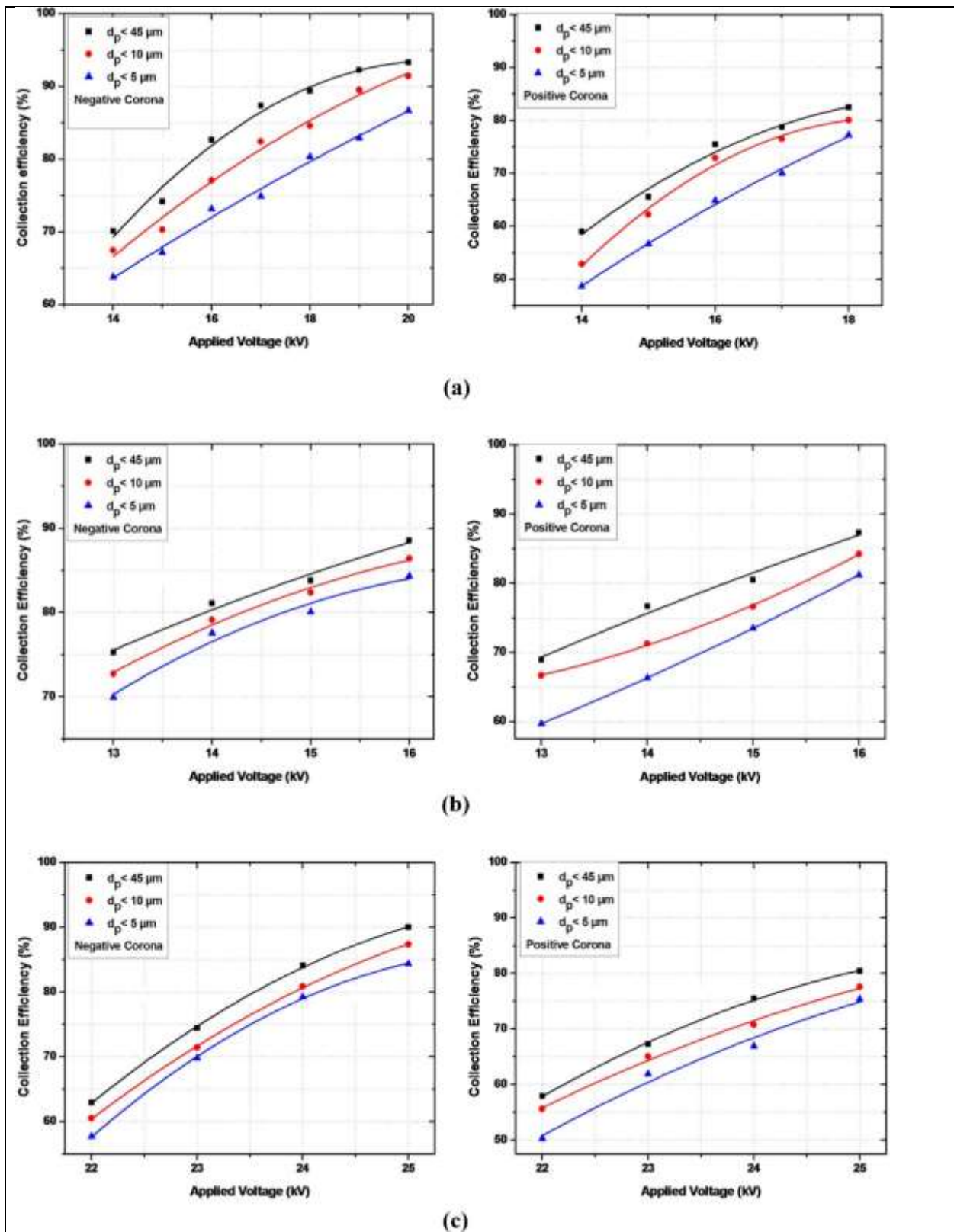


Figure III.13- efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée sous différentes tailles de particules, (a) lame de scie 1, (b) lame de scie 2 et (c) lame.

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

Les électrodes à grande et petite lame ont un courant corona spécifique plus faible que les électrodes à grande et petite lame "lame de scie 2". La figure III.13 présente les efficacités de collecte de masse des particules des trois électrodes de forme différente pour différents diamètres de particules. L'électrode à lame de scie 2 est la meilleure des trois électrodes en termes d'efficacité de collecte des particules.

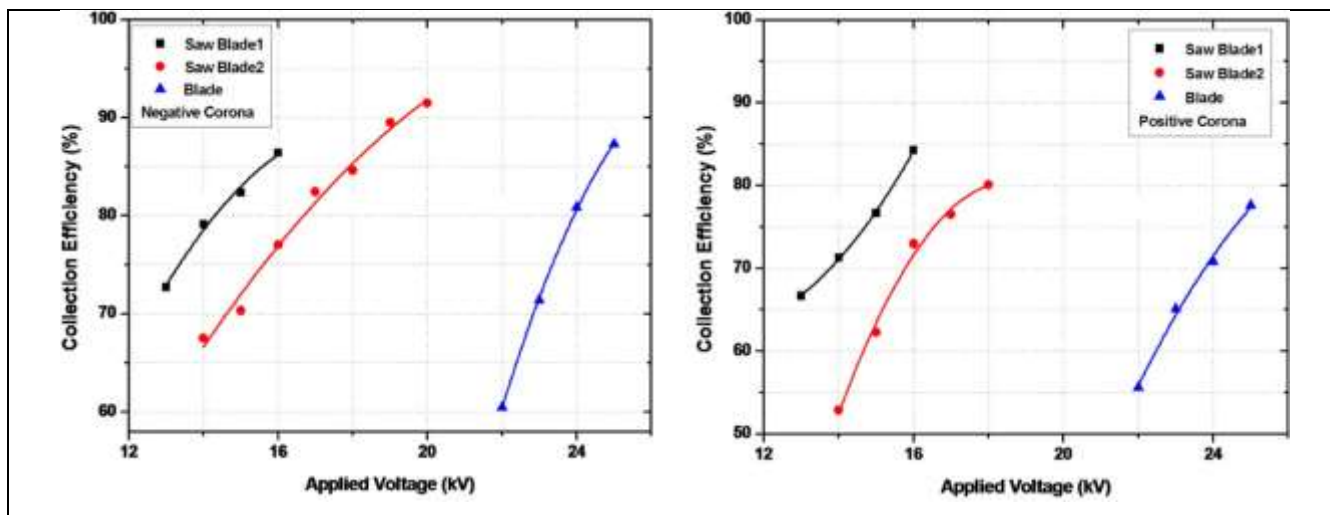


Figure III.14 - .Efficacité de collecte des électrodes de formes différentes en fonction de la tension appliquée pour la taille des particules  $dp < 10 \mu m$  dans les deux polarités.

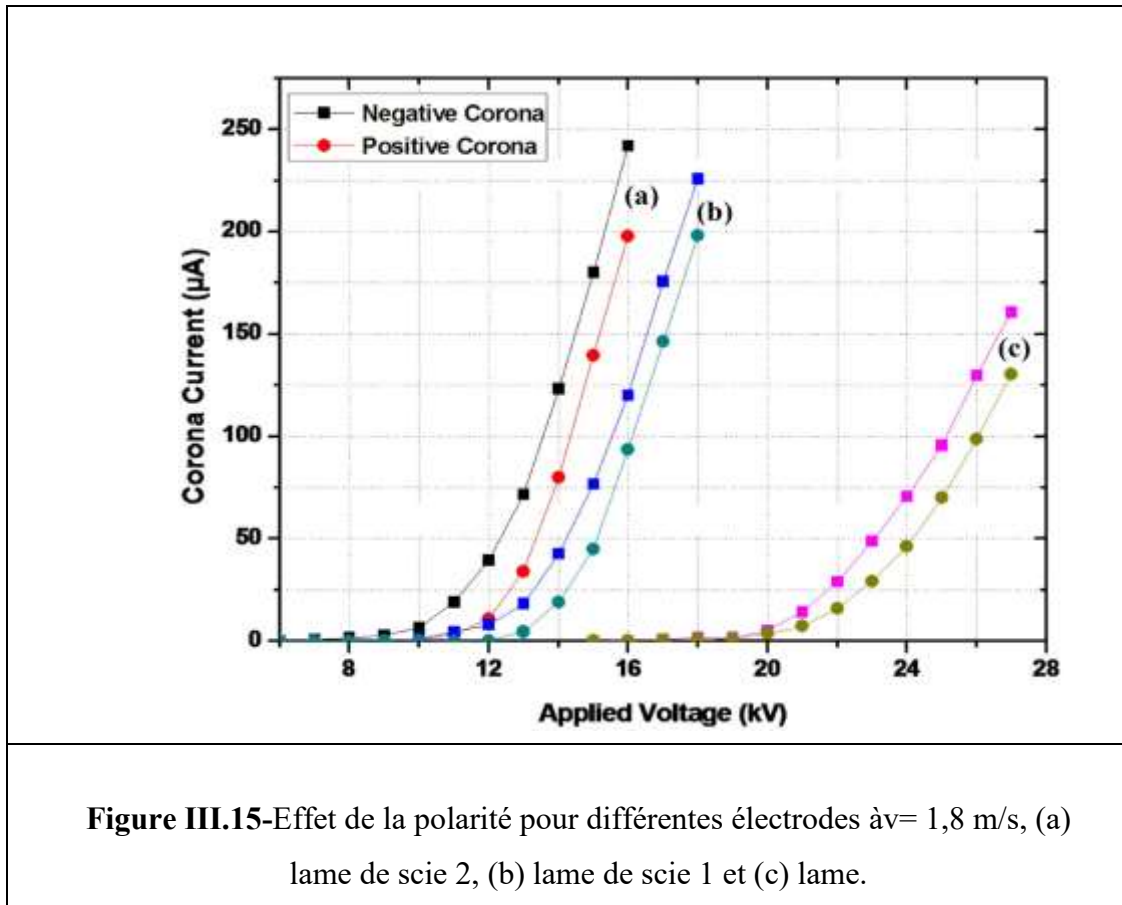
Les performances de collecte des particules étaient de 73,11 %, 84,33 % et 57,71 % respectivement pour un diamètre de particule inférieur à  $5 \mu m$  en couronne négative et de 64,88 %, 81,23 % et 50,3 % respectivement en couronne positive. Les résultats suggèrent que l'électrode à lame de scie 2 était la meilleure géométrie des électrodes actives pour les divers diamètres de particules. Les performances de collecte des particules des trois électrodes sont directement liées à leurs caractéristiques de décharge. Ils sont étroitement liés aux caractéristiques de décharge des trois électrodes. La meilleure efficacité de collecte des particules est obtenue par l'électrode à lame de scie 2 parmi les trois électrodes. Les électrodes avec des bords tranchants permettent de créer des champs électriques intenses et des décharges corona. Ces champs électriques intenses renforcent l'ionisation du gaz et la charge des particules, ce qui améliore l'efficacité de la collecte des particules.

#### III.4.7 Effet de la polarité sur l'efficacité de la collecte des particules

La figure III.15 illustre les caractéristiques courant-tension de la décharge corona pour

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

les polarités négative et positive. Il est clair que les caractéristiques obtenues dans le cas de la polarité négative sont toujours supérieures aux caractéristiques positives pour différentes formes d'électrodes, comme le montrent les courbes a, b et c de la figure III.15.

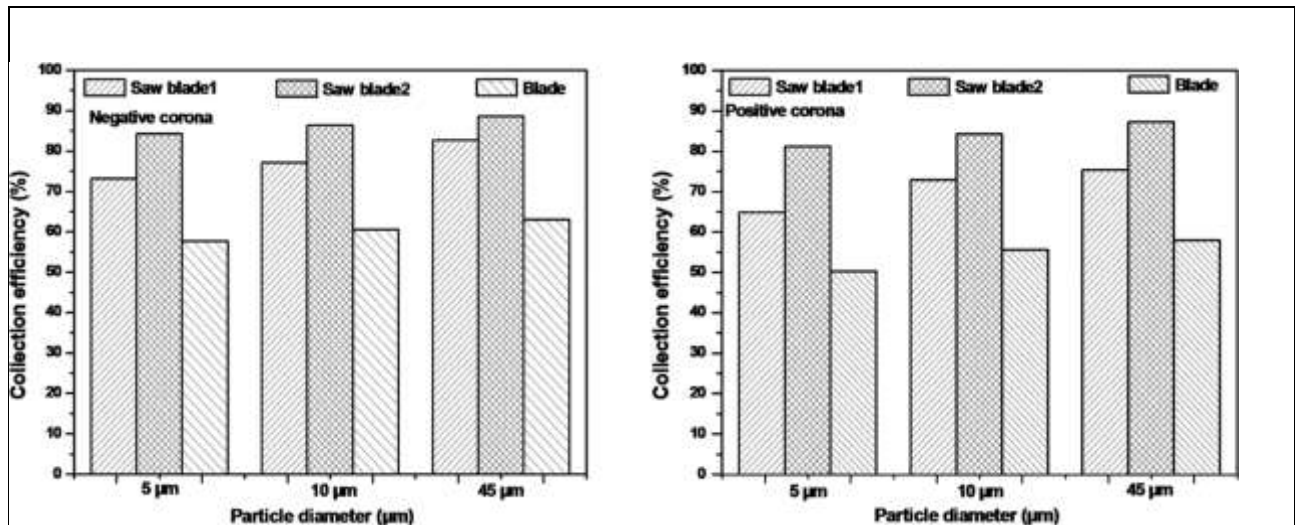


**Figure III.15**-Effet de la polarité pour différentes électrodes à  $v = 1,8$  m/s, (a) lame de scie 2, (b) lame de scie 1 et (c) lame.

Les électrodes à lame de scie 2 Figure III.15 a ont des valeurs de courant de décharge plus élevées que celles obtenues avec les électrodes de lames de scie 1 Figure III.15 b et de la lame Figure III.15 c.

En général, dans les ESP, on utilise plus souvent la décharge corona négative en raison de l'absence d'électrodes sur la lame de scie. La négative est utilisée plus fréquemment dans les ESP. En raison de sa taille plus importante. La décharge corona négative est généralement plus fréquemment utilisée dans les ESP en raison de son efficacité accrue dans la collecte des particules, comme le montre la figure III.16. Les ions négatifs exercent une plus grande force d'attraction sur les particules que les ions positifs. L'une des raisons pour lesquelles la décharge négative est souvent privilégiée dans les applications ESP est son avantage en termes d'efficacité

## Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans



**Figure III.15** -Efficacité de collecte de masse de particules d'électrodes de formes différentes sous différentes tailles de particules dans les deux polarités.

### III.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale Trois géométries de l'électrode actif ont été utilisées pour les expériences de précipitation électrostatique en injectant des particules de diamètres différents à chaque extrémité.

Les électrodes actives sont utilisées pour injecter des particules de diamètres variés à chaque étape de la manipulation. Donc, les résultats de l'électro filtre sont excellents.

De cette manière, les résultats du précipitateur électrostatique ont été étudiés dans diverses configurations en enregistrant les propriétés courant-tension du système d'électrodes, tant dans des conditions positives que négatives. Le système des électrodes est composé de polarités positives et négatives, avec ou sans particules. Dans cette étude, les résultats expérimentaux obtenus sont la moyenne de cinq séries de mesures effectuées dans les mêmes conditions. Il est important de souligner que la disparité entre les différentes séries est faible et surtout acceptable. Quatre conclusions ont été obtenues :

### Chapitre III : Etude Expérimentale De L'Efficacité De Collecte De Trois Configurations De Précipitateurs électrostatique à lames-plans

- Pour les deux polarités, le courant de décharge recueilli au niveau du collecteur à plaques diminue de manière linéaire avec la vitesse du flux d'air. L'efficacité globale de la précipitation est augmentée par une diminution de la vitesse d'entrée du flux d'air et toute augmentation de la vitesse du flux d'air entraînera une diminution du temps nécessaire pour charger les particules.
- Selon les mesures électriques, il est observé que le courant de décharge recueilli diminue lorsque des particules sont présentes. En réalité, le courant de décharge augmente lorsque la polarité est inverse. La collecte efficace des particules de l'ESP Dans le cas d'une décharge corona négative de la lame de scie à petites dents, l'ESP atteint 92% de la lame de scie à dents fines (lame2). Cependant, l'efficacité de collecte augmente considérablement avec le diamètre des particules injectées en deux polarités.
- Les données expérimentales confirment la validité de la lame de scie avec électrode à petites dents, et les résultats des courbes I-V sont très compatibles avec les données expérimentales disponibles.
- La recherche du système optimal a été réalisée en comparant toutes les géométries d'électrodes (lame de scie à grandes dents, lame de scie à petites dents et lame de scie à petites dents). Une étude a été menée pour découvrir le système optimal d'un ESP

- [1] Aissou, M., H. Ait Said, H. Nouri, and Y. Zebboudj. 2015. Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of monopolar DC wire-to-plane system. *Journal of Electrostatics*. 76:108–114. doi: 10.1016/j.elstat.2015.05.019.
- [2] Ait Said, H., H. Nouri, and Y. Zebboudj. 2015. Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics* 73:19e25. doi: 10.1016/j.elstat.2014.10.004.
- [3] Ait Said, H., M. Aissou, A. Laifaoui, N. Hebbar, M. Kaci, H. Nouri, and Y. Zebboudj. 2022. Experimental analysis of corona current density distribution and electric field at variable temperatures in electrostatic precipitator. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 58 (4):339–349. doi: 10.3103/S1068375522040032.
- [4] Ait Said, H., M. Aissou, H. Nouri, and Y. Zebboudj. 2019. Analysis of the current-voltage characteristic during the corona discharge in wires-to-planes electrostatic precipitator under variable air humidity. *Acta Physica Polonica A* 135 (3):320–5. doi: 10.12693/APhysPolA.135.320.
- [5] Arif, S., D. J. Branken, R. C. Everson, H. W. J. P. Neomagus, M. A. Noras, L. A. Le Grange, and A. Arif. 2021. An experimentally validated computational model to predict the performance of a single-channel laboratory-scale electrostatic precipitator equipped with spiked and wire discharge electrodes. *Journal of Electrostatics*. 112:103595. doi: 10.1016/j.elstat.2021.103595.
- [6] Atten, P., F. M. J. McCluskey, and A. C. Lahjomri. 1987. The electrohydrodynamic origin of turbulence in electrostatic precipitators. *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-23 (4):705–11. doi: 10.1109/TIA.1987.4504969.
- [7] Chang, J. S. 2003. Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems. *Journal of Electrostatics*. 57 (3–4):273–91. doi: 10.1016/S0304-3886(02)00167-5.
- [8] De Oliveira, A. E., and V. G. Guerra. 2021. Electrostatic precipitation of nanoparticles

- and submicron particles: review of technological strategies. *Process Safety and Environmental Protection* 153:422–438. doi: 10.1016/j.psep.2021.07.043.
- [9] Feng, Z. B., Z. W. Long, S. Q. Cao, and K. Adamiak. 2018a. Characterization of electrohydrodynamic (EHD) flow in electrostatic precipitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis. *Journal of Electrostatics* 91:70–80. doi: 10.1016/j.elstat.2017.12.008.
- [10] Gongming, T., S. Qiang, and Y. Qiang. 2018. Mechanism study of electrostatic precipitation in a compact hybrid particulate collector. *Powder Technology* 328:84–94. doi: 10.1016/j.powtec.2018.01.016.
- [11] Jaworek, A., A. Marchewicz, A. T. Sobczyk, A. Krupa, and T. Czech. 2018. Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM<sub>2.5</sub> particle emission.
- [12] *Progress in Energy and Combustion Science* 67:206–233. doi: 10.1016/j.peccs.2018.03.003.
- [13] Jaworek, A., A. T. Sobczyk, A. Krupa, A. Marchewicz, T. Czech, and L. Śliwiński. 2019. Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review. *Separation and Purification Technology* 213:283–302. doi: 10.1016/j.seppur.2018.12.011.
- [14] Jedrusik, M., and A. Swierczok. 2013. The correlation between corona current distribution and collection of fine particles in a laboratory-scale electrostatic precipitator. *J. Electrostat* 71:199–203.
- [15] Kim, S., K. Park, C. Choi, M. Y. Ha, and D. Lee. 2022. Removal of ultrafine particles in a full-scale two-stage electrostatic precipitator employing a carbon brush ionizer for residential use, *Journal of Building and Environment* 223:109493. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109493.
- [16] Nouri, H., and Y. Zebboudj. 2010. Analysis of positive corona in wire-to-plate electrostatic precipitator. *The European Physical Journal Applied Physics* 49 (1):11001. doi: 10.1051/epjap/2009181

- [17] Nouri, H., M. Aissou, H. Ait Said, and Y. Zebboudj. 2017. Active electrode shape effect on the corona discharge in an electrostatic precipitator. *Environmental Engineering and Management Journal* 16 (11):2545–2551.
- [18] Nouri, H., N. Zouzou, L. Dascalescu, and Y. Zebboudj. 2016. Investigation of relative humidity effect on the particles velocity and collection efficiency of laboratory scale electrostatic precipitator. *Process Safety and Environmental Protection* 104:225–232. doi: 10.1016/j.psep.2016.09.001.
- [19] Parera, OF. 2022. *Children’s Health and the Peril of Climate Change*. New York, NY: Oxford University Press. doi: 10.1093/oso/9780 197588161.001.0001.
- [20] Parker, K. 2007. *Electrical operation of electrostatic precipitators*. The Institution of Electrical Engineers, London.
- [21] Pauthenier, M., and M. Moreau-Hanot. 1934. *Electrician*, 113:187.
- [22] Shen, H., W. X. Yu, H. W. Jia, and Y. M. Kang. 2018. Electrohydrodynamic flows in electrostatic precipitator of five shaped collecting electrodes. *Journal of Electrostatics* 95:61–70. doi: 10.1016/j.elstat.2018.08.002.
- [23] Sparks, T., and G. Chase. 2016. *Filters and Filtration Handbook*, 6th ed. Elsevier. doi:10.1016/C2012-0-03230-9
- [24] Teng, C., and J. Li. 2021. Performance of reduction on particle emission by combining the charged water drop atomization and electric field in wet electrostatic precipitator. *Process Safety and Environmental Protection* 155:543–554. doi: 10.1016/j.psep.2021.09.035.
- [25] Townsend, M. 1915. *Electricity in Gases*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- [26] Wang, J., T. Zhu, Y. X. Cai, J. F. Zhang, and J. B. Wang. 2020. Review on the recent development of corona wind and its application in heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 152:119545. doi:

10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119545.

- [27] Xu, X., C. Zheng, P. Yan, W. Zhu, Y. Wang, X. Gao, Z. Luo, M. Ni, and K. Cen. 2016. Effect of electrode configuration on particle collection in a high-temperature electrostatic precipitator. *Separation and Purification Technology* 166:157–63. doi: 10.1016/j.seppur.2016.04.039.
- [28] Zheng, C., C. Liang, S. Liu, Z. Yang, Z. Shen, Y. Guo, Y. Zhang, and X. Gao. 2018. Balance and stability between particle collection and re-entrainment in a wide temperature-range electrostatic precipitator. *Powder Technology* 340:543–52. doi: 10.1016/j.powtec.2018.09.056.
- [29] vicomtrade.cz/Regulated High Voltage DC Power Supplies GLASSMAN HIGH VOLTAGE INC. Designing Solutions for High Voltage Power Supply Applications.
- [30] static-int.testo.com/ testo-625-Fiche-technique.
- [31] static-int.testo.com/ testo-417\_BE\_FR.

## **Chapitre IV**

*Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques*

*'humidité- température' sur la décharge*

*Couronne dans une configuration de précipitateur*

*Électrostatique*

*À nappe de pointes- deux plans*

## ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

### **IV.1 Introduction**

Aujourd'hui, la description de la décharge couronne est le sujet de nombreuses recherches théoriques et expérimentales, en raison de son utilisation très étendue dans divers domaines d'activités commerciales et industrielles [1]. En ce qui concerne les précipitateurs électrostatiques, où la séparation des particules est fortement influencée par la gestion des champs électriques, il est essentiel de voir comment ces facteurs environnementaux interagissent avec les caractéristiques physiques des conducteurs. Il serait avantageux de mieux appréhender ces échanges pour améliorer l'efficacité énergétique des installations. En général, les électrodes couronne sont constituées de pointes, de fils ou de lames reliés à une alimentation à haute tension.

La répartition de la charge électrique sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne est influencée par la configuration du système. Le champ électrique produit par ces électrodes [2]-[3]. Les électrodes à base de pointes ont des tensions d'amorçage corona plus faibles et une meilleure résistance mécanique que les électrodes de type fil, par exemple [5]. Le problème est que la décharge générée par une telle géométrie n'est pas uniforme [4]. Toutefois, à cause des multiples facteurs d'influence et de la difficulté d'observation directe, la physique sous-jacente de la décharge couronne reste floue et demande des études plus en profondeur [3].

L'objectif de ce chapitre est d'explorer l'effet des conditions environnementales « la température et l'humidité » sur la décharge couronne obtenue lors de l'implantation des électrodes actives type « pointes » dans un dispositif de précipitation électrostatique. Le défi était de concevoir une électrode multi-pointes de manière à générer un effet de charge aussi uniforme par rapport aux deux plans parallèles passives de telle sorte de capter les particules de ciment injectées.

### **IV.2 Caractérisation électrique de la décharge couronne**

L'étude expérimentale de la décharge couronne est réalisée en deux parties : la première,

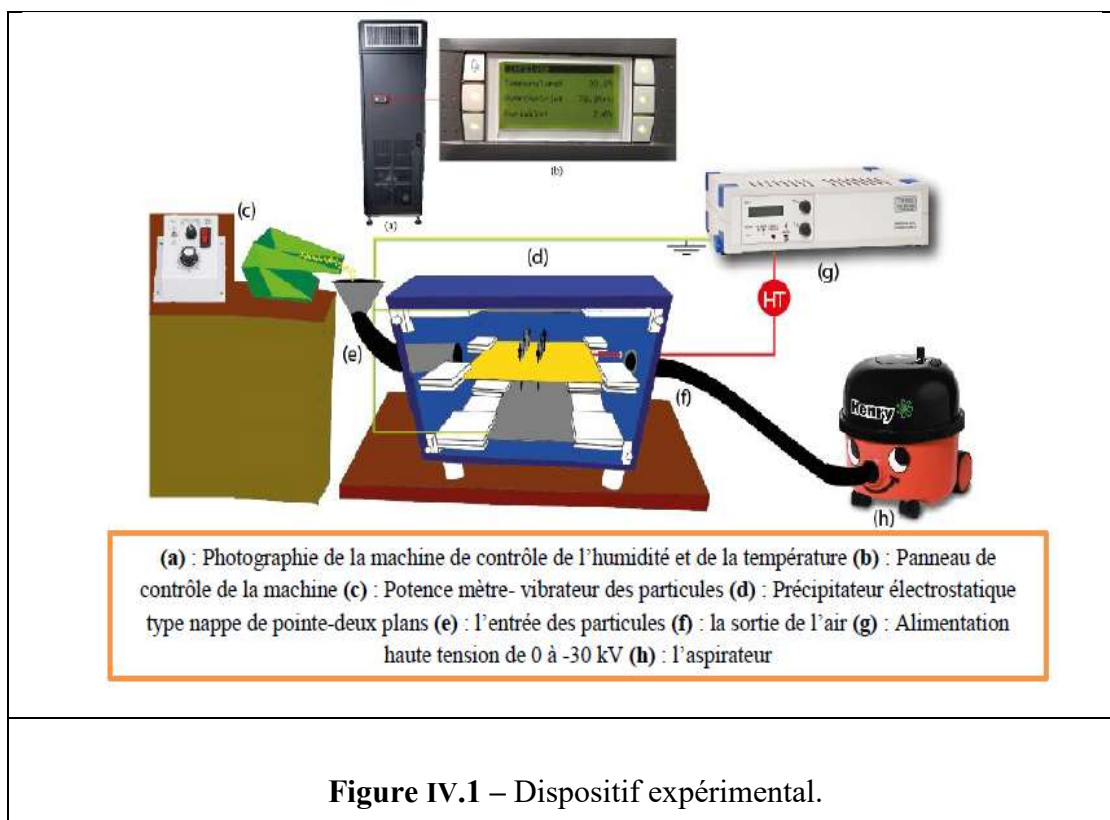
## *Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*

consiste d'étudier l'effet de la température sur la caractéristique « courant –tension », La seconde partie concerne l'analyse de l'impact de la variation de l'humidité sur la filtration électrostatique. Pendant les deux parties, les particules seront injectées afin d'étudier l'efficacité de précipitateur électrostatique. Ces particules de ciment ont les mêmes caractéristiques chimiques que celles injectées dans le dispositif étudié en chapitre n°03 de types Lames-deux plans.

### IV.3 Description du dispositif expérimental

#### III.4 Le banc expérimental

Le but de cette section est de décrire le dispositif des essais expérimentaux d'un banc de laboratoire qui a été construit au niveau de laboratoire Pprim de l'université de Potiers. Le dispositif expérimental désigne un précipitateur électrostatique d'une configuration géométrique de type nappe de pointes- deux plans. La conception de ce dispositif facilite le témoignage des phénomènes de la décharge couronne.

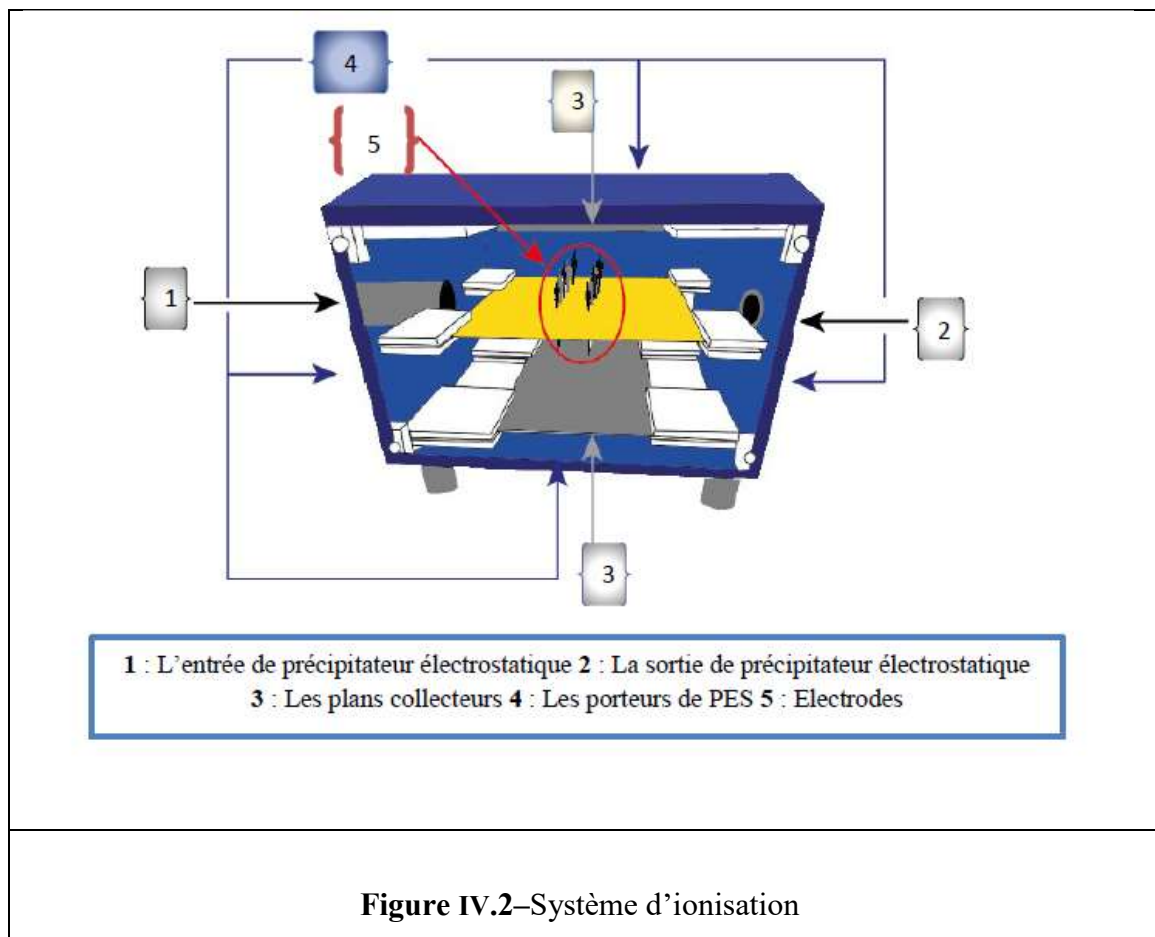


## Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans

Nous pouvons distinguer cinq principales parties :

- Le précipitateur électrostatique de type nappe de pointes- deux plans
- Un vibreur- potence mètre pour l'injection des particules à l'entrée du PES
- Le dispositif de contrôle de l'humidité et de la température ambiante
- La source de la haute tension continue
- Un aspirateur est installé à la sortie de PES

### IV.4.1 La zone d'ionisation



La figure IV.2 montre la représentation schématique de l'ESP. L'étage unique de l'ESP utilisé dans cette étude se compose de deux électrodes passives parallèles connectées à la terre par l'intermédiaire d'un microampèremètre, il est fabriqué dans des plans rectangulaires en acier Inoxydable de 185 mm de long, 310 mm de large et 2 mm d'épaisseur, et de deux nappes de onze pointes reliés à la haute tension. Les électrodes

#### ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

étaient parallèles à la plaque. Les principales dimensions de précipitateur électrostatique sont présentées dans le tableau 1, comme la distance entre deux électrodes actives successives est maintenue à 20 mm et la distance entre l'électrode active et l'électrode passive est de 50 mm.

#### **IV.4.2 L'électrode active :**



**F**

**igure IV.3 :** Photographie d'une décharge corona multi-pointes DC au laboratoire Pprim

Les électrodes actives se désignent des pointes d'aiguille « MICRO-PRUEF MPS » série RoHS 775-710 d'une longueur de 9,5cm et un diamètre de 0,64mm. La tension nominale est : 60 V DC et la plage de température : -25 °C jusqu'à ...+80 °C. La section supérieure des aiguilles de pointes a été coupée pour que les pointes supérieures soient parallèles au plan rectangle passif. L'injection de la haute tension vers les électrodes actives a été utilisée pour effectuer des tests préliminaires afin de garantir la décharge couronne au niveau des pointes avant d'entamer les essais expérimentaux de précipitateur électrostatique et établir le bon fonctionnement de la zone dérive notamment après l'injection des particules de ciment Figure IV.3

## ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

### **IV.4.3 Le choix des électrodes actives**

En général, les électrodes couronne sont constituées de pointes, de fils ou de lames reliés à une alimentation à haute tension [29]-[30]. **L'uniformité** du champ électrique produit par ces électrodes est influencée par **l'uniformité** de la charge électrique déposée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne. Ainsi, la cohérence du champ électrique qu'elle produit est un indicateur essentiel de qualité pour toute électrode couronne [27], [28], [31]. En se basant sur l'objectif de travail réalisé par docteur Mohamed Sofiane Bendilmi dans sa thèse portant le thème « **Étude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique** ». Cette thèse vise principalement à étudier les limites des méthodes de décharge couronne, en mettant l'accent sur l'uniformité de charge obtenue avec l'utilisation d'électrodes couronne multi-pointes, étant donné leur potentiel d'utilisation dans le traitement de surface des plaques diélectriques ou dans la séparation électrostatique de mélanges granulaires. Le défi consistait à élaborer l'électrode de type pointe de façon à produire un effet de charge aussi homogène que possible à la surface des corps soumis à la décharge [32].

### **IV.5 Méthode de mesure**

#### **IV.5.1 Mesure de la tension appliquée**

Afin d'étudier l'effet de la variation de « température et l'humidité » sur la caractéristique « courant – tension », on utilise les polarités positives et négatives de la haute tension continue. La tension continue est fournie par un bloc d'alimentation (série LT, de Iseg High Voltage Power Supply, 0.3 mA, 30 kV), pour les deux polarités. Une tension continue (DC) positive ou négative est fournie aux électrodes corona « la nappe de pointes » par une source allant de 0 à 30 kV. Par la suite, on applique un micro-ampèremètre (électromètre iseg, modèle T1CP 300 304P) sur l'électrode de plaque passive afin de mesurer le courant moyen. Pendant les expériences, l'électromètre utilisé est un électromètre numérique de la marque iseg, modèle T1CP 300 304P (Voir figure III.3).

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*



**Figure IV.4 :** Alimentation haute tension de 0 à -30 kV.

#### **IV.5.2 Mesure de masse des particules**

Il est nécessaire de mesurer les masses granulaires avant et durant chaque expérience. Nous avons utilisé une balance électronique Kern 440-47N (figure 4.6) d'une résolution de 0.1g et d'une portée de 2000g.



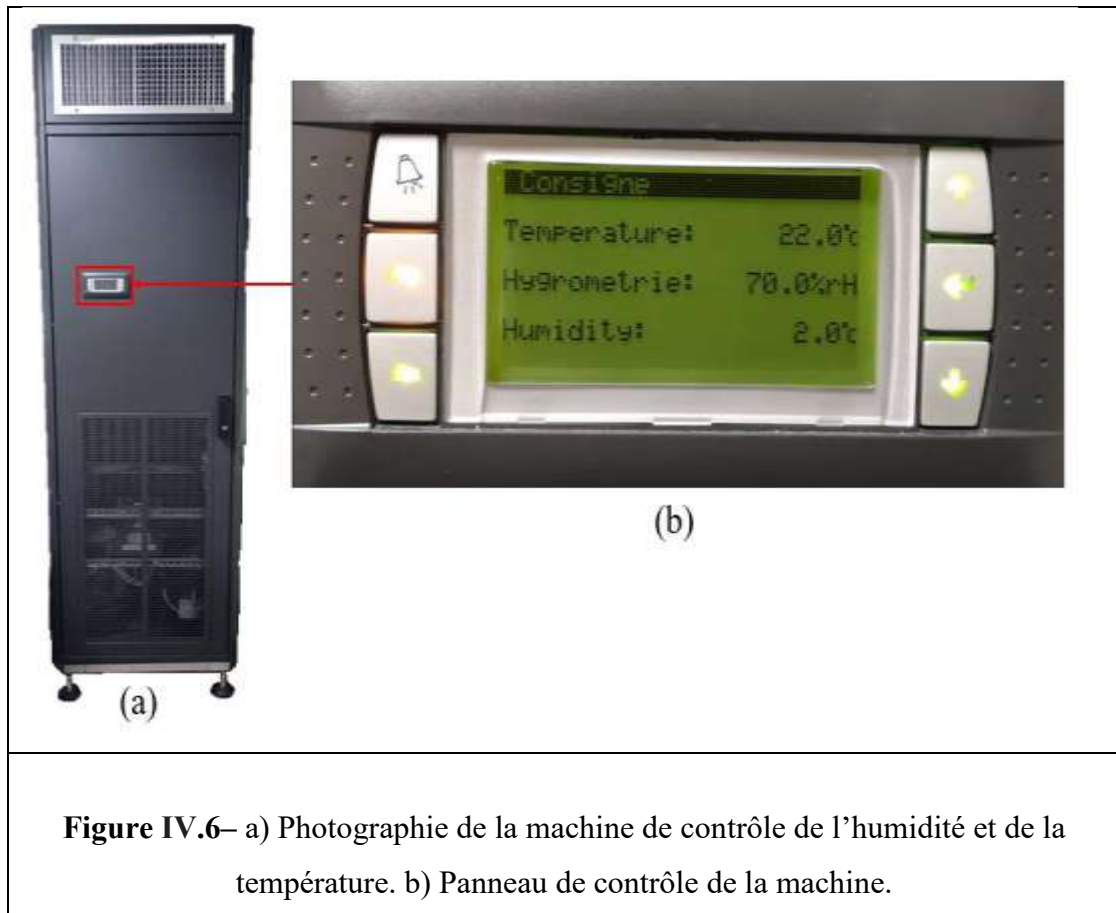
**Figure IV -5.**Balance numérique KERN 440-47N.

#### **IV.6 Dispositif de contrôle de l'humidité et de la température ambiante**

#### ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

L'humidité et la température ambiante sont des facteurs ayant une grande influence sur la génération de charge par effet triboélectrique. Aussi est-il fortement recommandé de maintenir ces deux facteurs constants tout au long du déroulement des expériences. Une étude a été menée pour évaluer l'influence de l'humidité ambiante sur le chargement triboélectrique des polymères. Un dispositif de contrôle des conditions climatiques « Armoire C A/W » (Figure II.16.a) a permis de contrôler et de maintenir constantes l'humidité et la température du local dans lequel se sont déroulées les expériences. Le taux d'humidité dans le local a pu être varié de 10% à 80%, tandis que de la température a été réglée entre 10 °C et 40 °C. Les armoires de climatisation « C A/W » ont été fabriquées pour répondre d'une manière efficace au besoin de rafraîchissement des salles développant une charge thermique élevée et où la production centralisée d'eau glacée n'est pas présente. Ces unités répondent aussi bien aux salles d'archives, conservation, musée, laboratoire, IRM, Radiologie, Scanner, etc. Le niveau de bruit global des unités est maintenu à un faible seuil par l'utilisation de compresseurs "scroll", qui sont installés avec le circuit frigorifique dans un compartiment séparé du flux d'air. Les unités ont été conçues pour présenter la plus faible empreinte possible au sol, avec accès total façade, facilitant l'inspection et la maintenance. Cette armoire est aussi équipée d'une isolation interne thermique et acoustique en polyuréthane expansé auto extinguable de classe 1 anti feu (UL 94-HF1) densité 30 Kg/m<sup>3</sup> et une conductibilité thermique de 0,033 w/m°C, avec une épaisseur de l'isolant de 20mm sur le panneau externe et de 15mm sur le panneau interne. L'armoire est composée des joints étanches à l'air autour des panneaux à double densité de polyuréthane avec un bac condensas en Inox 304, équipé d'un siphon pour les unités à soufflage inversé. La batterie responsable de l'alimentation de la machine est une batterie froide type détente directe avec tube en cuivre et ailettes aluminium, recouverte d'un film hydrophile, et un multi distributeur type venturi sur chaque circuit contenant une filtration de type lavable en fibre synthétique, avec cadre en acier galvanisé et d'efficacité G4 selon la norme EN779. L'armoire dispose également d'un ventilateur type EC à commutation électronique, commandé par un signal 0-10 V.

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*



**Figure IV.6**– a) Photographie de la machine de contrôle de l'humidité et de la température. b) Panneau de contrôle de la machine.

Le ventilateur est monté sur plots antivibratoires. Il est aussi équipé d'un compresseur hermétique de type "scroll", avec vannes de sécurité. Le moteur électrique à deux pôles avec protection thermique interne est installé dans un compartiment séparé du flux d'air et monté sur plots antivibratoires. L'armoire thermique contient un déshydrateur à cristaux de silice, qui assure le contrôle de l'humidité ambiante de la chambre d'essais, et un voyant liquide avec indicateur d'humidité avec changement de couleur, ainsi qu'un détendeur thermostatique à égalisation externe. Deux pressostats de sécurité font également partie des composants de la machine, le premier est un pressostat à haute pression avec réarmement manuel, quant au deuxième de basse pression, il est à réarmement auto. Un circuit frigo en tube de cuivre calorifié est fixé à la structure de l'unité de façon appropriée. L'armoire dispose également d'un coffret électrique complet avec : sélectionneur général en façade, contrôleur de phase, disjoncteur thermique pour chaque organe, contacteurs moteurs ventilateurs, contacteurs moteurs compresseurs, transformateurs pour organes auxiliaires et des composants et des câblages conformes aux normes CE. L'armoire thermique est équipée

## ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

d'une interface utilisateur (Figure IV.4), pour la visualisation des conditions de fonctionnement, avec les caractéristiques suivantes :

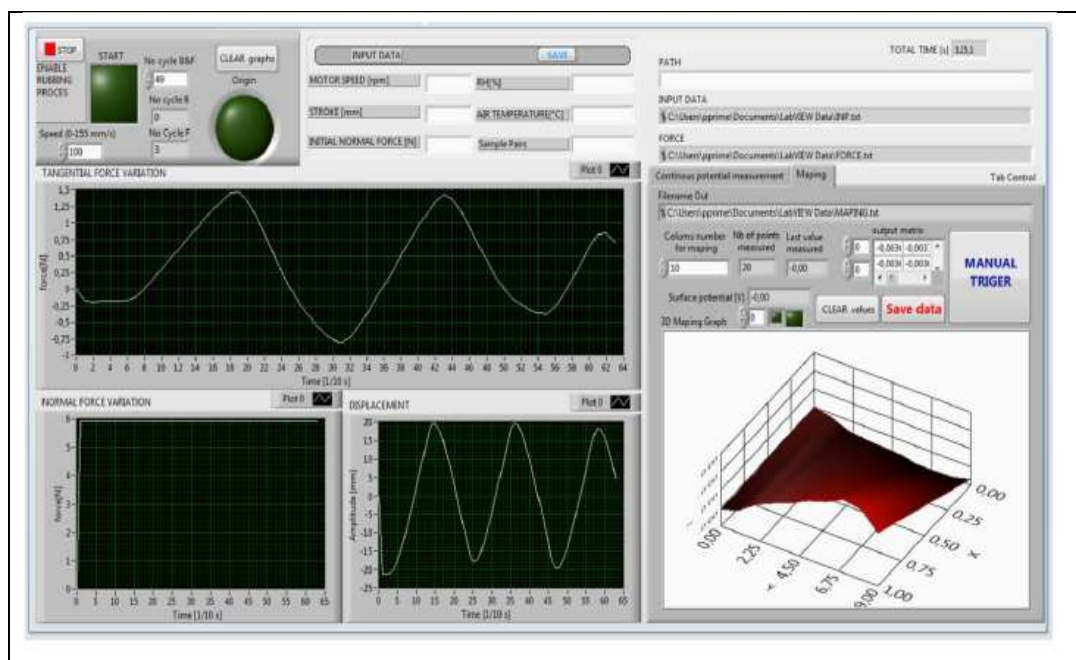
### **IV.6.1 Mesure de potentiel de surface**

Pour faciliter l'interprétation du potentiel électrique donné par le voltmètre quand la sonde balaye la surface d'isolants non-uniformément chargés, des configurations expérimentales simples ont été utilisées. Dans les paragraphes suivants les installations sont décrites ainsi que le procédé pour l'interprétation de la mesure du potentiel.

### **IV.6.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle**

Le pilotage de l'installation expérimentale est assuré par un poste de contrôle géré par un programme **LabVIEW** de National Instrument. L'interface utilisateur pour le pilotage du banc est présentée sur la figure IV -5. Le programme permet de contrôler le régime de fonctionnement et de visualiser en temps réel les mesures des capteurs de force et déplacement. L'interface permet la visualisation des cartographies du potentiel électrique de surface après déplacement de l'éprouvette sur l'installation de mesure du potentiel. L'équipement de mesure des forces est étalonné et calibré pour assurer des mesures de qualité. La force normale est mesurée sur une plage de 0N à 20 N et celle de la force tangentielle à  $\pm 15$  N. Les capteurs de force fonctionnent avec des jauges résistives (JPRM model STC 1205) de portée nominale  $\pm 50$  N et de résolution 0,025 N. Ils sont alimentés avec le conditionneur (10) (NEWPORT model INFCS) qui convertit également le signal de sortie sur une plage de  $\pm 10$  V compatible avec la carte d'acquisition NI USB 6210 (12).

## Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans



**Figure IV -7.** Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.

La mesure du déplacement est réalisée avec le capteur TNC modèle L50R LVDT (Linearly Variable Displacement Transducer). Le capteur (6) permet une mesure avec résolution 0,05 mm et une étendue de 56 mm. Le conditionneur TNC model GDL (11) alimente et convertit le signal du capteur de déplacement (6). Les signaux analogiques des capteurs sont connectés à une carte d'acquisition de données multifonctions NI USB-6210. Elle dispose de 16 entrées analogiques ( $\pm 10$  V, 16 bits, 250 kéch./s), 4 entrées numériques, de 4 sorties numériques à 5V chacune et de deux compteurs 32 bits. Ce matériel constitue une solution idéale parfaitement compatible avec le logiciel Labview. Le contrôle du moteur électrique entraînant le système bielle-manivelle ou du moteur linéaire est assuré par un circuit électronique en pont H (LMD18200T) qui fournit une tension d'alimentation de 12V à 55V avec un courant maximum de 6A. Le pilotage se fait avec une carte Arduino UNO commandée par Labview [33].

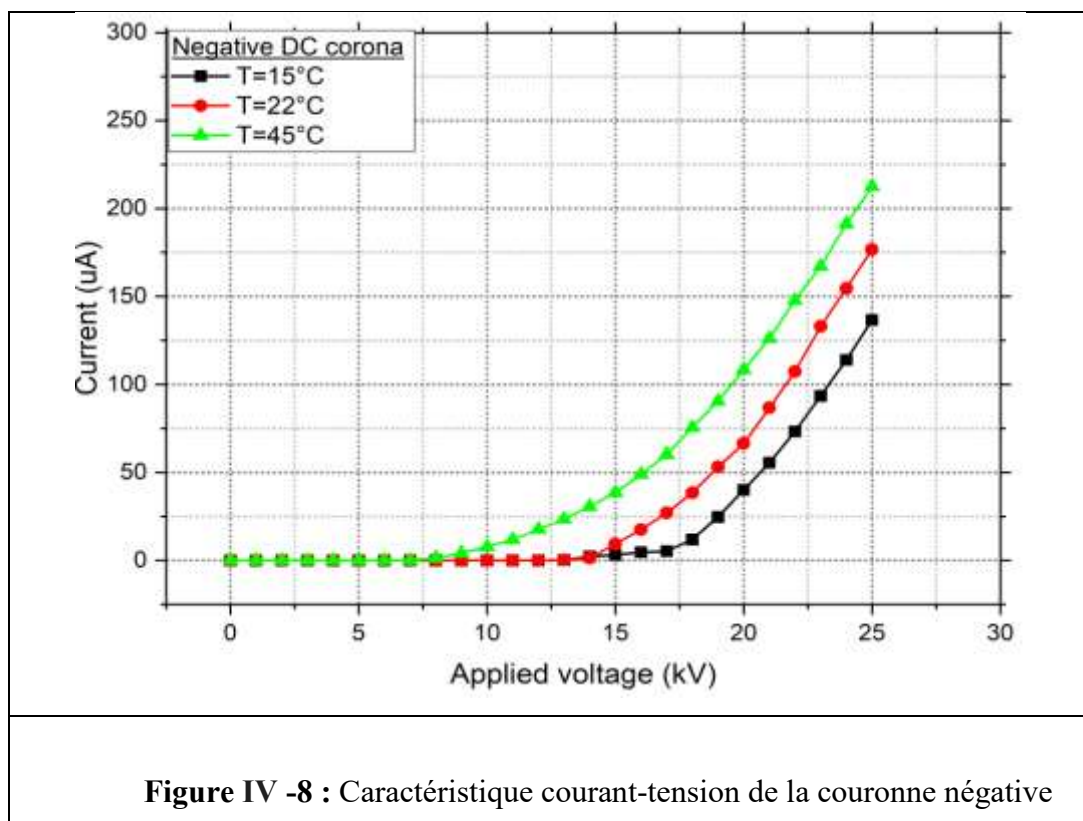
*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*

**IV.7 Résultats et discussion**

**IV.7.1 L'étude expérimentale de l'effet de température**

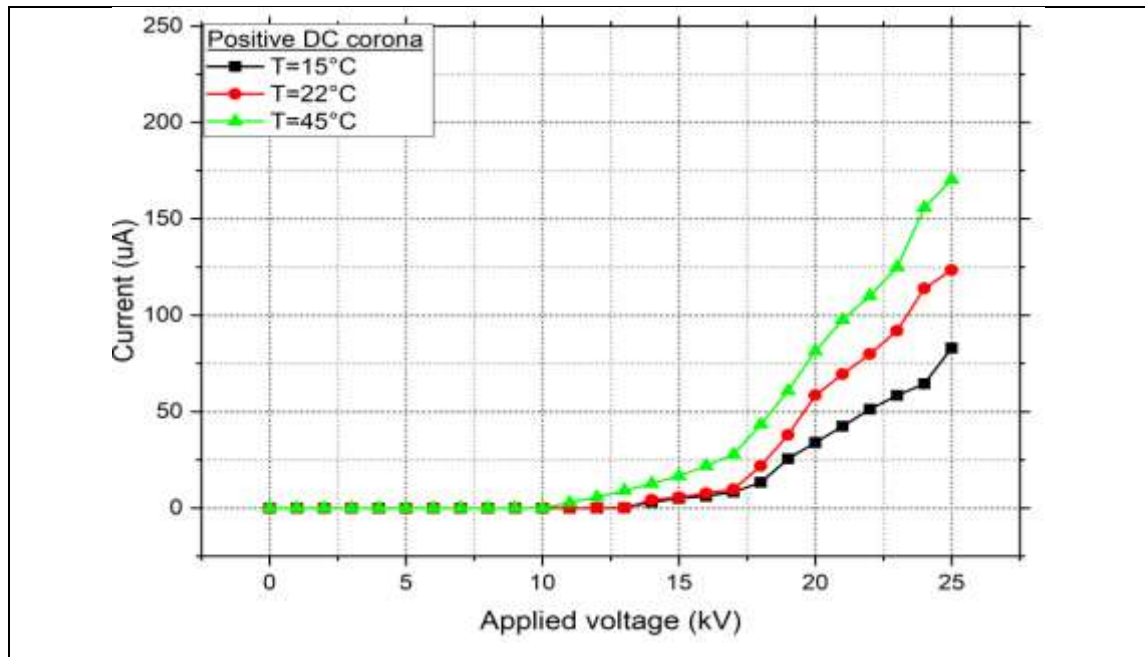
**IV.7.2 La caractéristique de courant- tension :**

La courbe courant-tension à une température de gaz de 15 °C, 22 °C et 45 °C sous couronne positive et négative est illustrée dans les figures 1 et 2. Les données indiquent une diminution du courant corona avec une baisse de température. La décharge corona s'enflamme à une tension plus faible en raison du diamètre de l'électrode active.



La densité de l'air augmente avec la diminution de la température, ce qui accélère la collision des particules transportant des molécules chargées avec des neutrons et ralentit la migration des ions. Efficacité. La densité de charge spatiale autour du pôle coronal augmente sous une contrainte continue à des températures décroissantes. Lorsque la tension doit être proche du pôle fermé, la densité de charge augmente, augmentant la tension de claquage [6]

**Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans**



**Figure IV -9** : Caractéristique courant-tension de la couronne positive.

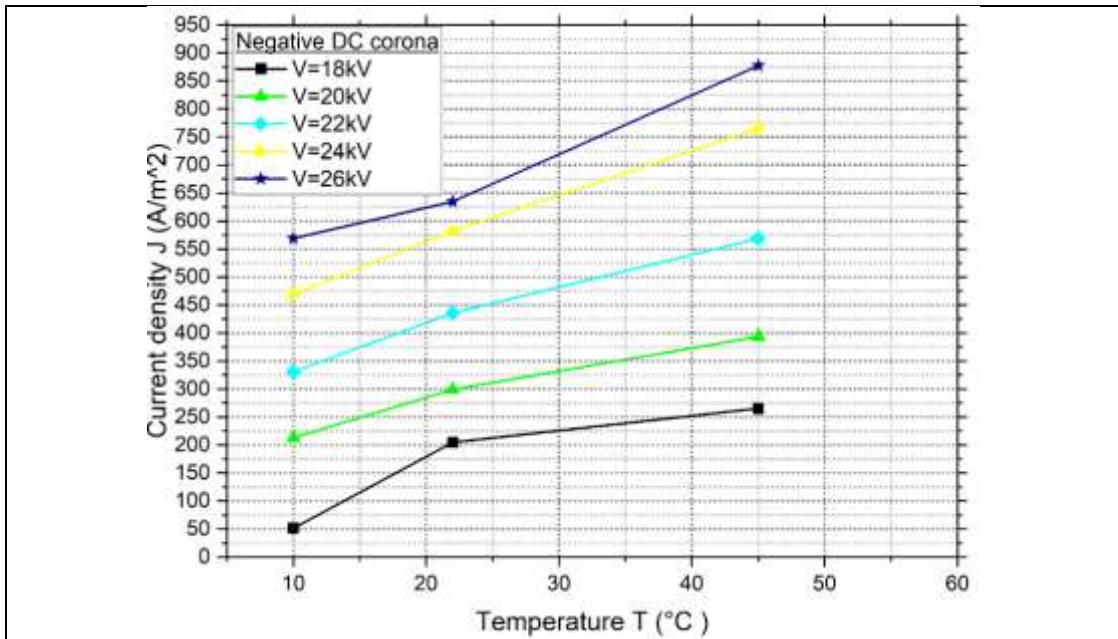
**IV.7.3 La densité de courant de l'électrode active :**

Des études montrent que le courant corona diminue et que la tension de claquage augmente avec la diminution de la température, ce qui affecte la densité de courant dans la configuration pales-plan ESP [8]. Les figures 3 et 4 montrent les caractéristiques de densité de courant-tension du précipitateur électrostatique multi-aiguilles-à-plan à différentes températures. Le  $J$  mesuré à l'électrode active augmente linéairement avec la température  $T$  pour les couronnes positives et négatives :

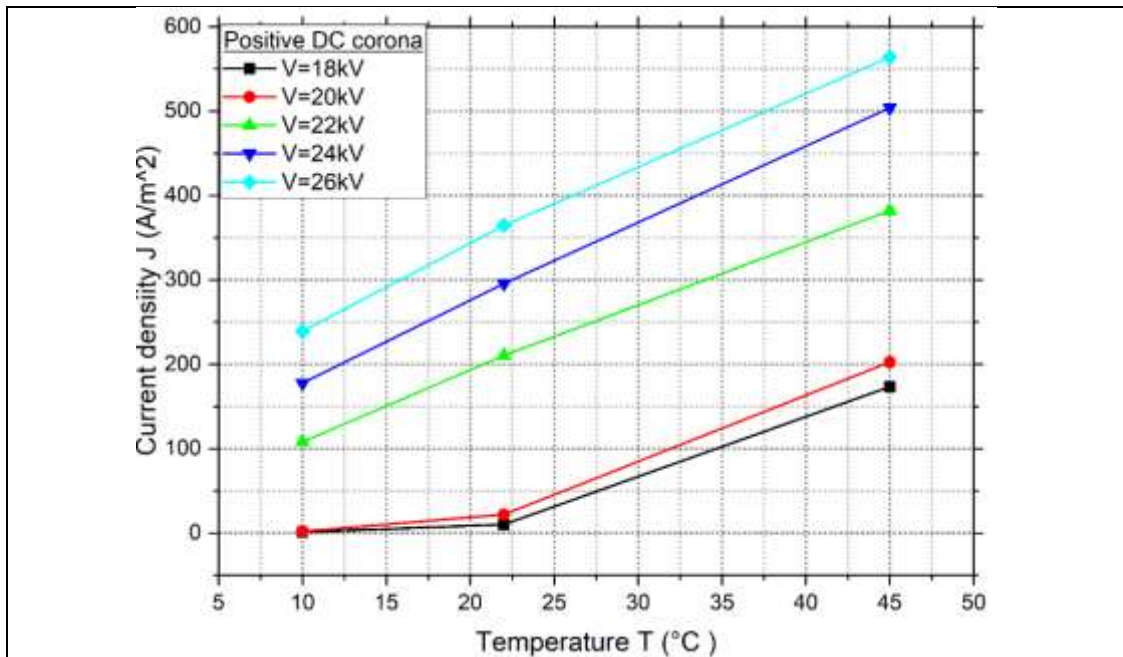
$$J = \frac{I_0}{\pi r^2} \quad [2]$$

Où  $r = 0,3$  mm est le rayon effectif de l'aiguille et  $I_0$  le courant collecté de la décharge couronne.

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*



**Figure IV -10 :** Variation de la densité de courant de la couronne négative avec la température.



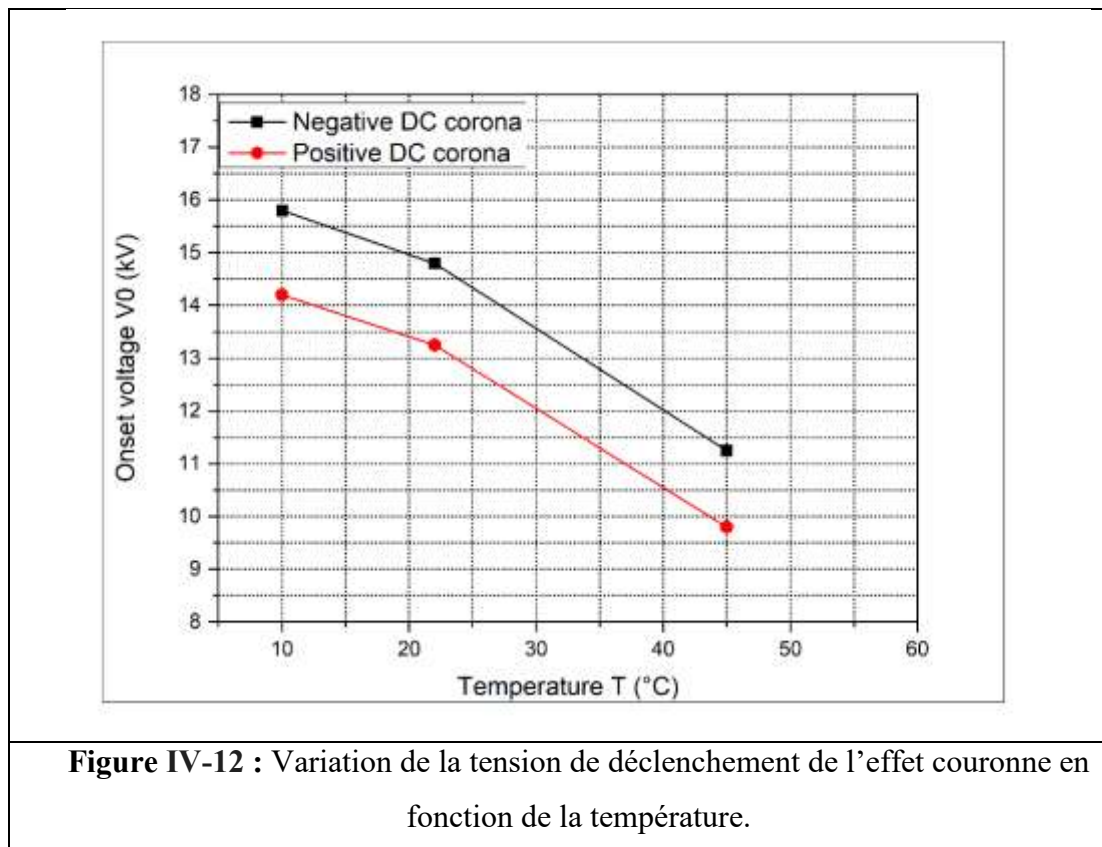
**Figure IV -11 :** Variation de la densité de courant de la couronne positive avec la température.

#### *Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*

Dans un électrofiltre (ESP), la température a un impact significatif sur la densité de courant. Des expériences avec une configuration ESP multi-aiguilles-plans ont montré que des températures plus élevées entraînent une augmentation de la densité de courant corona.

#### **IV.7.4 La tension d'amorçage :**

Dans les précipitateurs électrostatiques, la tension de déclenchement de la décharge corona est généralement mesurée en identifiant la tension appliquée correspondante qui initie la décharge corona en créant un champ sur la surface des fils de décharge tendus.[9].La figure 5 montre l'effet de la variation de température sur l'évolution de la tension de démarrage pour les deux polarités haute tension.

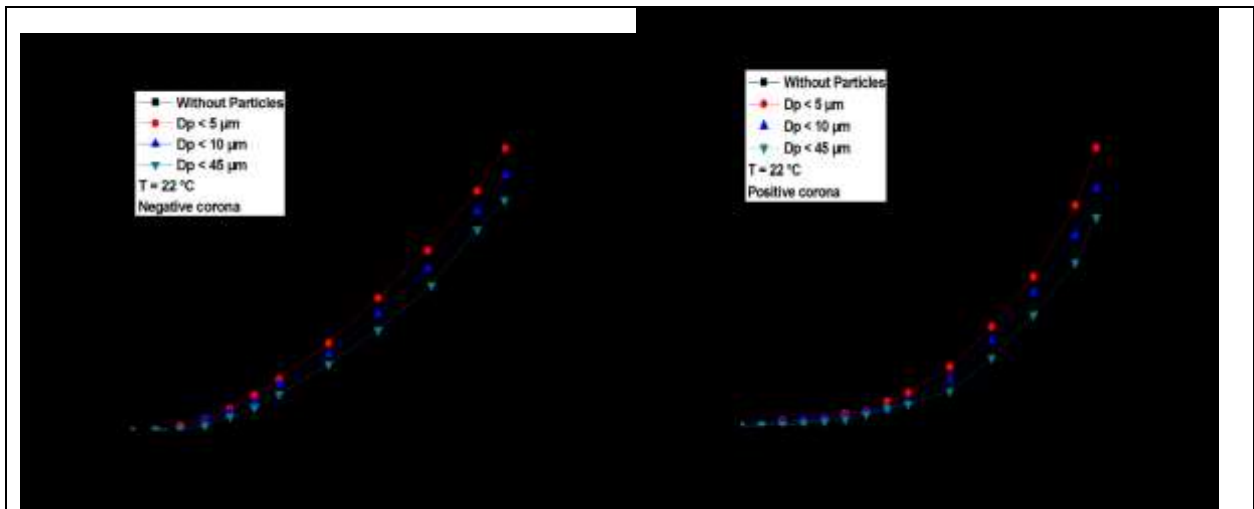


Par rapport à l'effet couronne négatif, l'effet couronne positif produit moins de perte de puissance. Le courant couronne dans un espace plan-point ou plan-sphère augmente avec la tension appliquée pour les alimentations CC positives et négatives ; cependant, en raison de la charge d'espace dans l'espace, le courant de polarité négative est supérieur au courant positif.

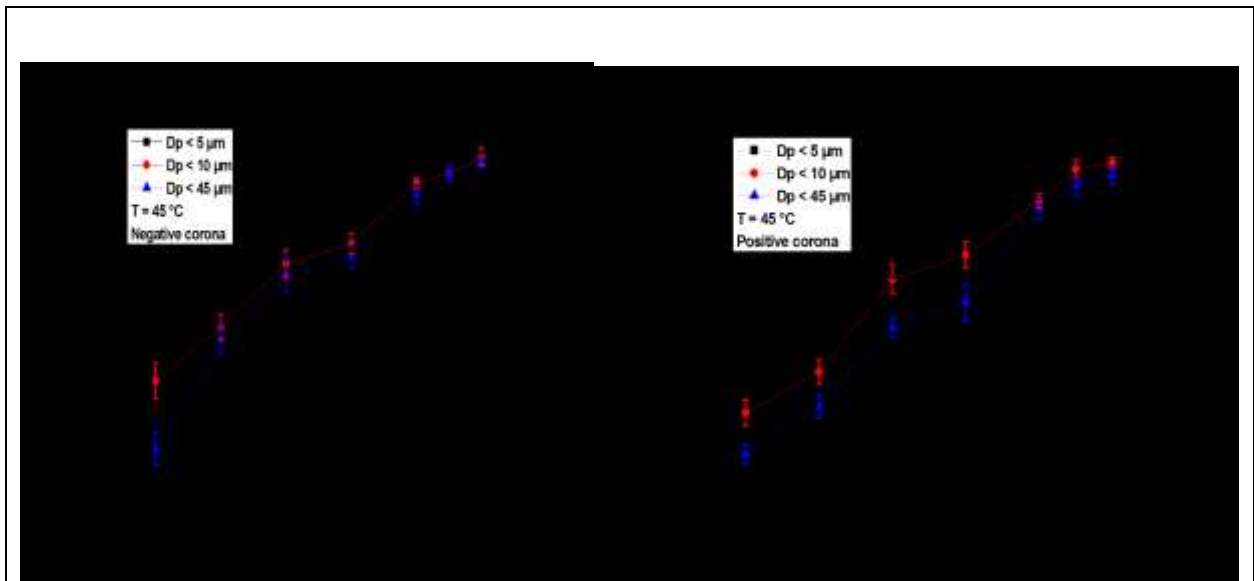
*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*

**IV.7.5 Efficacité de collecte :**

L'impact de la température sur l'efficacité de la collecte a été étudié dans divers contextes, notamment les précipitateurs électrostatiques à basse température et les systèmes de précipitation électrostatique à haute température [10]. La figure montre l'effet considérable de la température sur l'efficacité de collecte dans les précipitateurs électrostatiques, comme l'augmentation de la tension appliquée à l'électrode de décharge et du diamètre des particules conduisant à une efficacité de collecte accrue

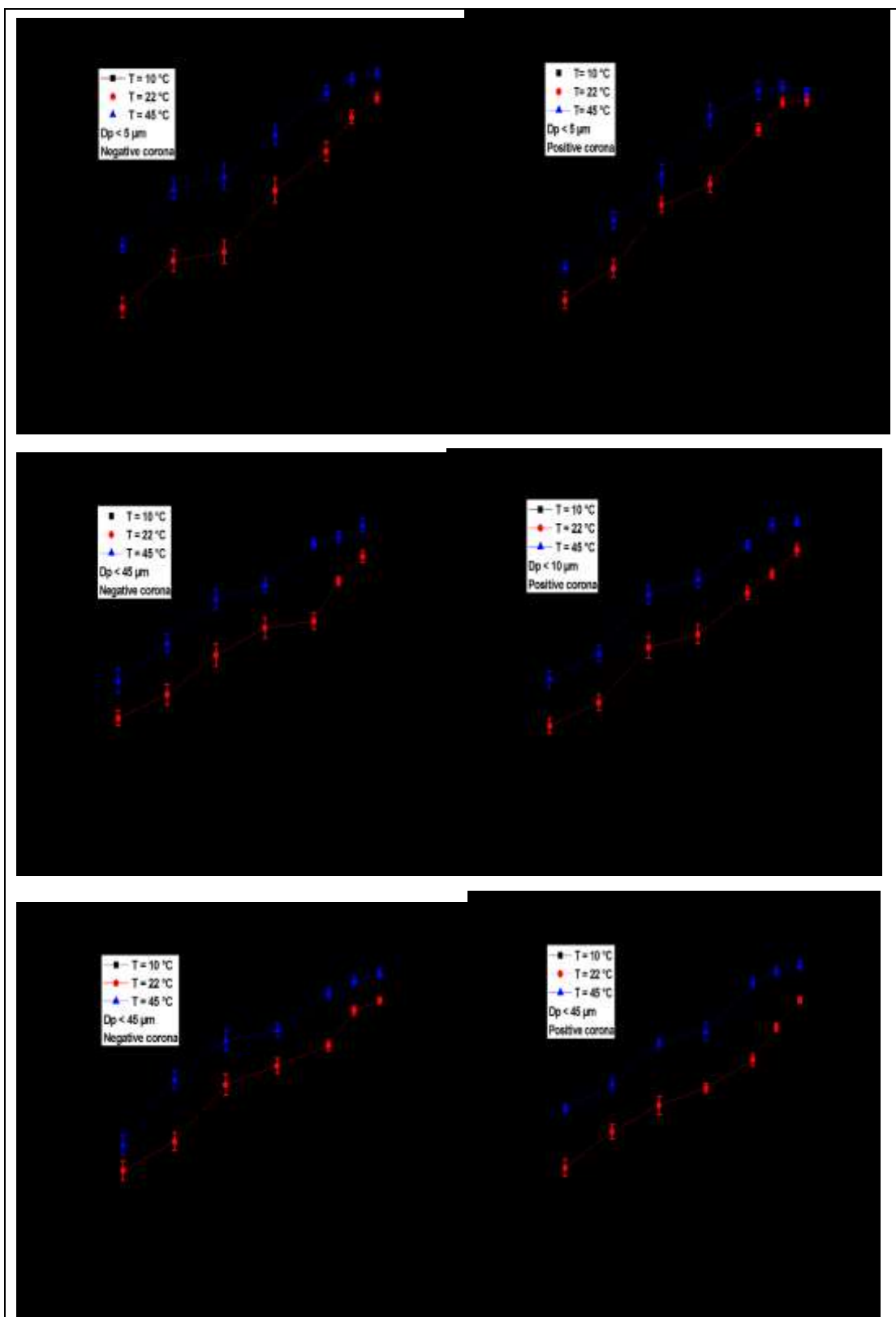


**Figure IV-13 :** la caractéristique courant- tension avec et sans particules en polarité positive et négative avec  $T=22^{\circ}\text{C}$



**Figure IV-14:** Efficacité de collecte de masse de particules de différentes valeurs de diamètre pour  $T=45^{\circ}\text{C}$  dans une couronne négative- positive

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*



**Figure IV-15 :** Variation de l'efficacité de collecte avec la taille des particules et la température dans une couronne négative et positive

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*

**IV.7.6 Mesure de potentiel de surface des électrodes passives**

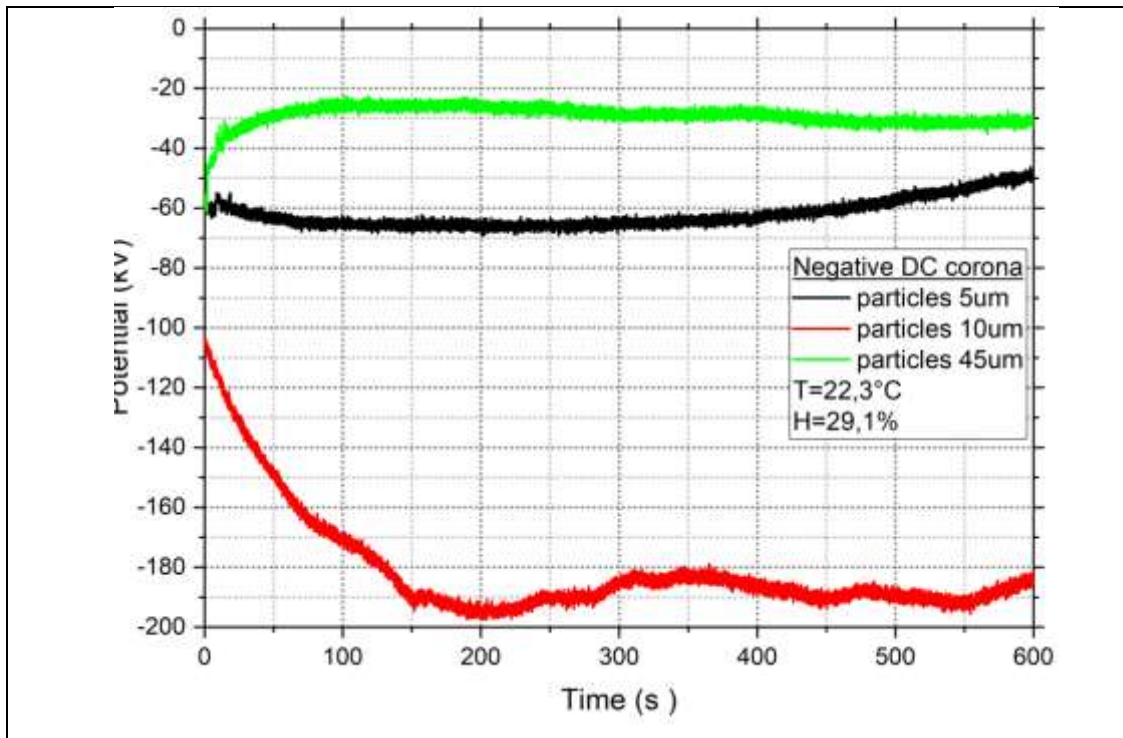
Cette étude examine la création de charge électrique au niveau des plans collecteurs passifs, étayant les conclusions antérieures selon lesquelles l'efficacité augmente en fonction de la tension et de la température appliquées et impose une connexion proportionnelle.

Les particules injectées sont rassemblées vers les plans dans un agencement à plusieurs aiguilles lorsque le potentiel appliqué est élevé, et un système d'acquisition est utilisé pour surveiller indirectement le potentiel de surface en fonction du temps. Consultez la figure 10. La sonde du voltmètre électrostatique, entraînée par un mécanisme à ressort, enregistre la valeur de potentiel la plus élevée à l'emplacement de mesure initial. Le voltmètre déplace par programmation la sonde de sa position de repos (à 10 cm de l'électrode couronne). Un système d'acquisition de données programme l'électrode couronne vers l'emplacement de mesure en 100 ms après la mise hors tension de la source d'alimentation de l'électrode couronne et la fin du processus de charge. Ce laps de temps permet une chute du potentiel à des valeurs inférieures à la limite de mesure de l'instrument de 3000 V [11].

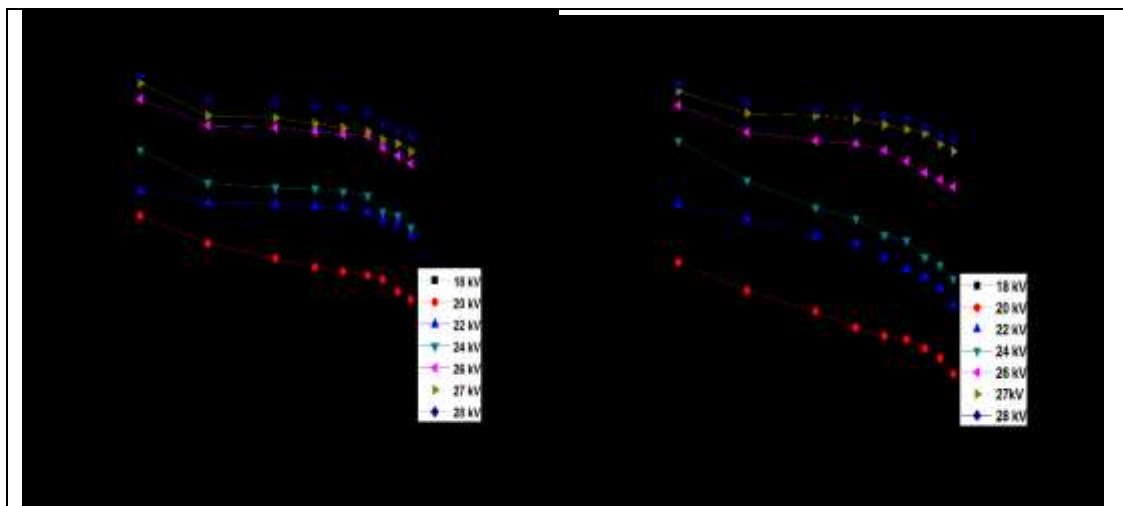


**Figure IV-16** : les processus de décharge de particules caractéristiques du plan collecteur

*Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans*



**Figure IV-17** : le potentiel caractéristique de décharge des particules du plan collecteur



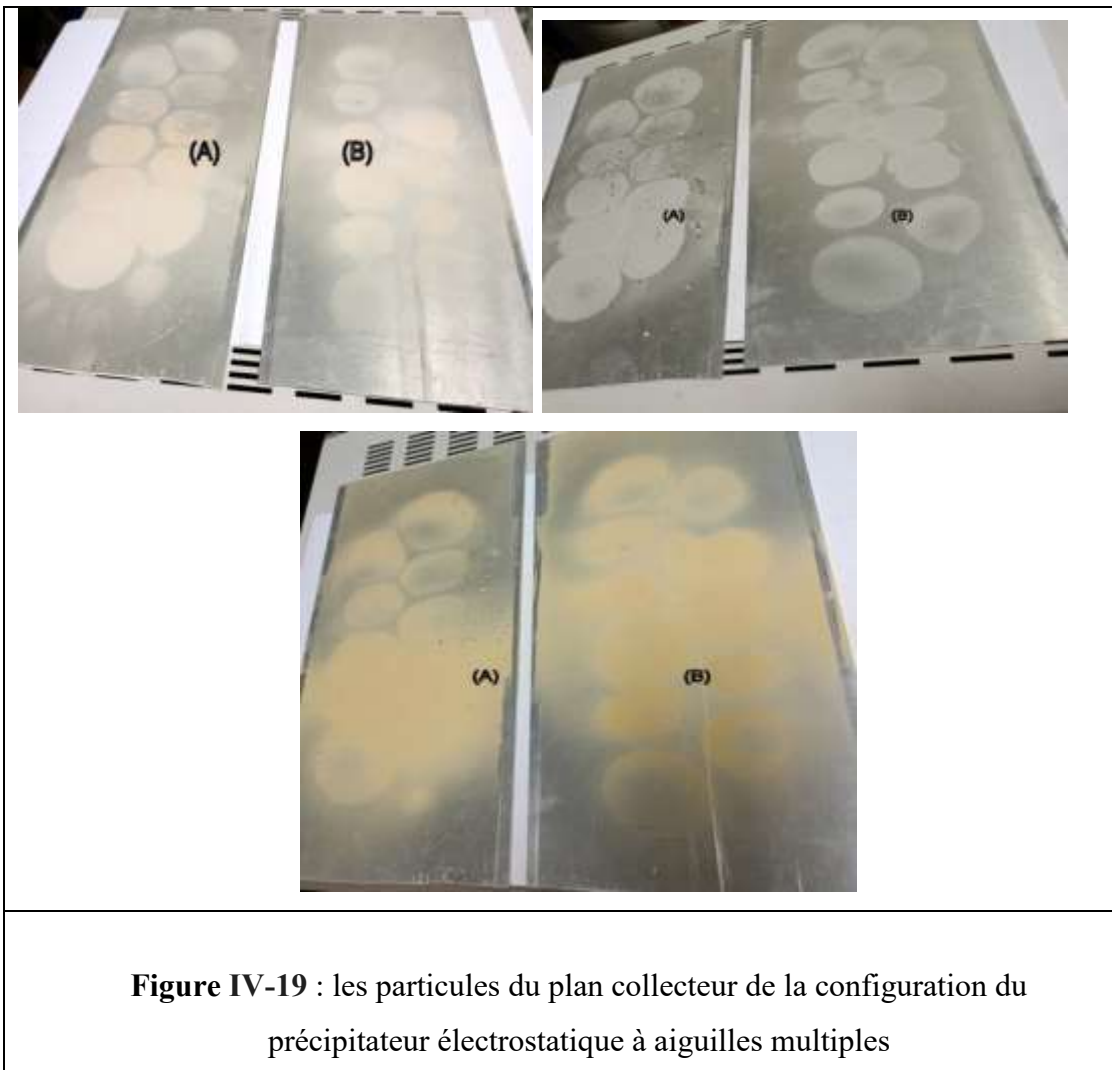
**Figure IV-18**: Effet de potentiel sur l'efficacité de collecte

Ces tests ont été réalisés à humidité ambiante (HR = 29 %, température : 22,3), en utilisant trois types différents de poussière de ciment de diamètres 5 µm, 10 µm et 45 µm. Après avoir exposé les couches de poussière à la décharge corona pendant dix secondes, une

**Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge corona dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans**

tension de 26 kV a été appliquée. Les particules chargées perdront progressivement leur charge acquise par la décharge corona, ce qui influencera leur potentiel résiduel. En conséquence, l'humidité des échantillons augmente, ce qui correspond à la nature des particules hygroscopiques, entraînant une diminution des valeurs initiales (maximales) enregistrées par l'instrument de mesure. En raison de l'influence de leur état d'électrification sur le comportement des poussières, il est possible que la vitesse à laquelle la charge électrique portée par ces poussières de ciment diminue soit grandement influencée par l'humidité.

**IV.7.7 L'uniformité de la charge :**



La distribution des charges électriques est directement corrélée à la géométrie de

## Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge corona dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans

l'électrode corona [12-13]. Le nombre d'aiguilles affecte l'uniformité de la décharge corona ainsi que la tension appliquée augmente, la décharge corona émerge d'abord sur les aiguilles extérieures, puis la couronne vers l'intérieur commence à apparaître sur les aiguilles intérieures [14].

### IV.8 L'étude expérimentale de l'effet de l'humidité

#### ➤ Effet du flux massique des particules de ciment (g/s)

L'effet du flux massique des particules de ciment dans un précipitateur électrostatique est déterminé par un certain nombre de paramètres, notamment la distribution granulométrique, les caractéristiques du flux de gaz et la conception et les conditions de fonctionnement du précipitateur.

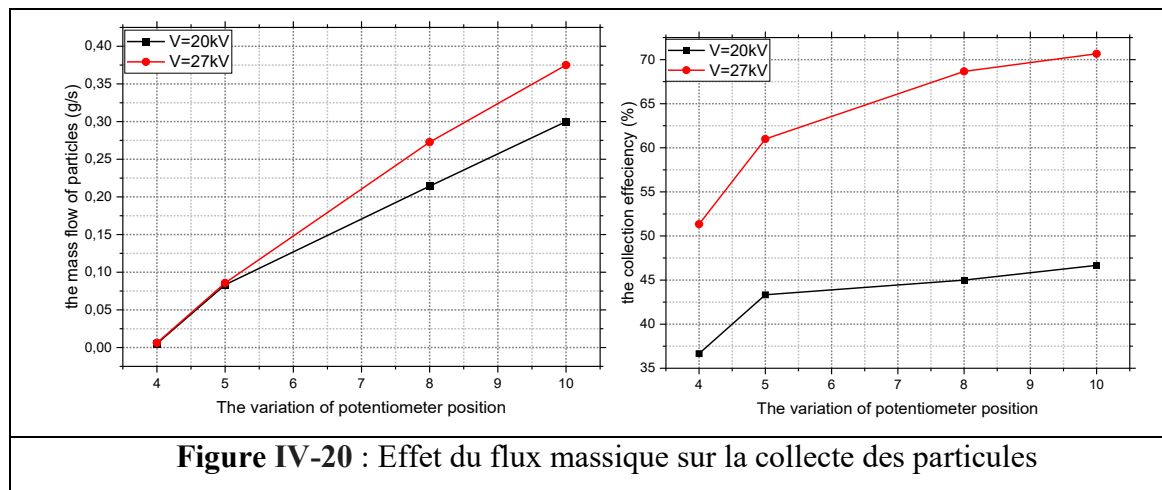


Figure IV-20 : Effet du flux massique sur la collecte des particules

Des facteurs tels que la distribution granulométrique, la vitesse du flux de gaz et l'intensité du champ électrique à l'intérieur du précipitateur influencent tous l'efficacité d'un précipitateur électrostatique dans la collecte des particules, y compris des particules de ciment. La distribution granulométrique des particules, en particulier des particules de ciment, influence les performances de collecte du précipitateur électrostatique. Le flux massique dans un précipitateur électrostatique est régi par les équations de conservation de la masse et de l'impulsion moyennes dans le temps pour un flux isotherme stable. La modification des positions de l'injecteur vibreur augmente les valeurs du flux massique et a un effet sur l'efficacité, en particulier dans la polarité négative. Les propriétés du flux de gaz, telles que la vitesse du flux d'air, la distance électrode-plaque et l'intensité du champ électrique, influencent toutes le comportement des particules chargées et l'efficacité du précipitateur.

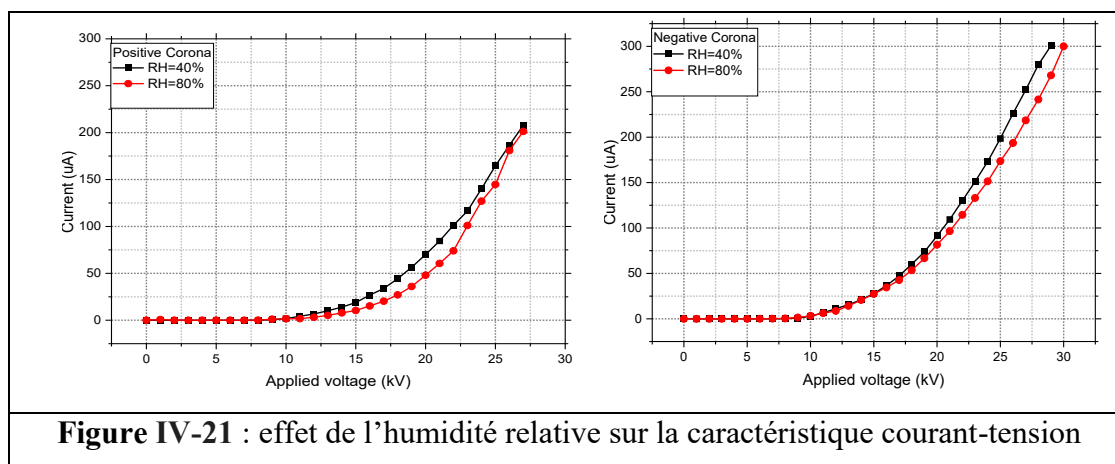
#### ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

L'efficacité de la collecte des particules est grandement influencée par le flux de gaz turbulent dans les précipitateurs électrostatiques. Il est essentiel de comprendre le comportement des particules chargées dans un écoulement de gaz turbulent pour optimiser l'efficacité du précipitateur. [15] L'effet du potentiel appliqué sur le flux massique des particules de ciment dans un précipitateur électrostatique est un sujet complexe qui est influencé par un certain nombre de facteurs. Le potentiel appliqué contrôle l'intensité du champ électrique dans le précipitateur, ce qui détermine le comportement des particules chargées et l'efficacité du précipitateur. La compréhension du comportement des particules chargées dans le précipitateur dépend de la distribution du potentiel électrique à la tension appliquée. [16] Le débit massique est calculé avec deux facteurs. Si le temps d'injection diminue avec l'augmentation de la position de l'injecteur vibré, alors le débit massique augmente et l'efficacité de collecte des particules de ciment est critique, en particulier pour la tension appliquée négative  $V=27\text{kV}$ . Cela est dû au fait que les particules injectées ont la même masse à chaque position de l'injecteur vibré. La masse des particules injectées et le temps d'injection seraient nécessaires pour déterminer le débit massique des particules injectées dans un système. De plus, comme indiqué dans l'un des résultats de recherche, l'évaluation des ESP à haut débit met en évidence l'importance du débit pour déterminer l'efficacité de l'ESP en tant que collecteur de particules.

#### **IV.9 Effet de l'humidité relative sur les caractéristiques courant-tension sans particules :**

Les caractéristiques courant-tension pour les deux polarités de tension et deux valeurs d'humidité relative (40 et 80 %) ont été obtenues avec une particule présente dans l'espace. Il va sans dire qu'à mesure que la tension appliquée augmente, le courant de décharge augmente régulièrement. De plus, pour une tension donnée, le courant de décharge est plus important avec une polarité négative en raison de la variation de la mobilité apparente des porteurs de charge [17]. Les variations d'humidité relative (HR) entre 40 % et 80 % affectent peu les courbes courant-tension. L'humidité relative n'augmente que légèrement le courant, en particulier en présence d'une couronne positive. Dans la plage d'humidité relative autorisée, il n'y a pas de changement notable dans les caractéristiques courant-tension.

## Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans



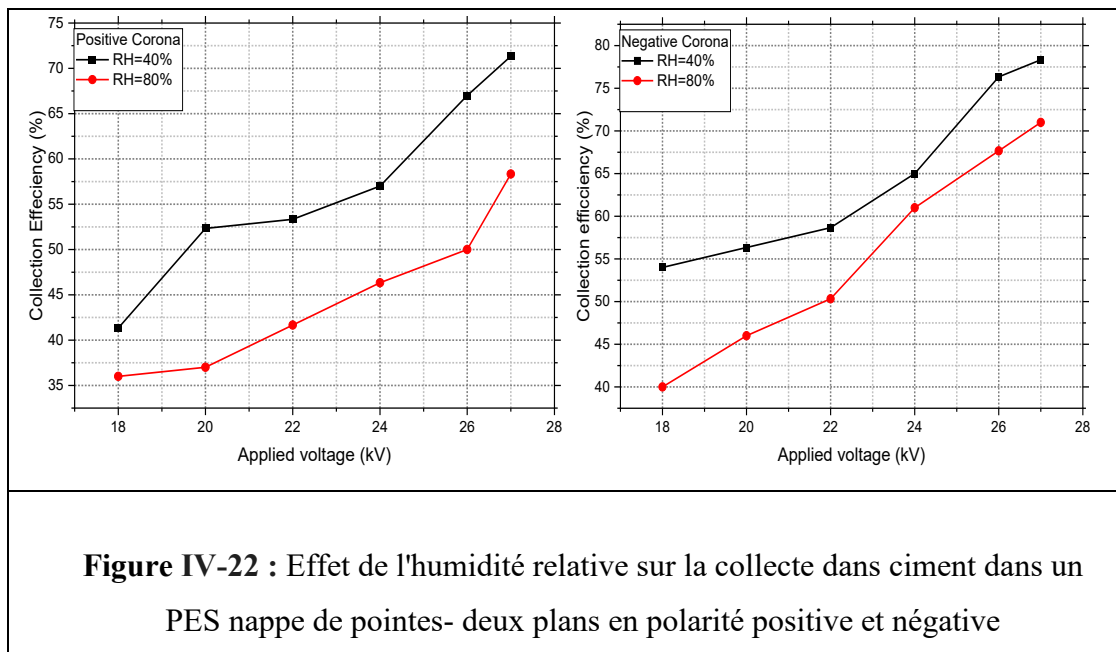
De même, il a été démontré que l'humidité relative de l'air d'entrée a un impact significatif sur le courant de décharge dans les ESP, le courant moyen dans le temps étant plus faible à des niveaux d'humidité relative plus élevés [18].

### IV.9.1 Effet de l'humidité relative sur l'efficacité de collecte de l'ESP

Des expériences ont montré qu'une augmentation de l'humidité relative de 30 % à 80 % augmente la charge moyenne des particules de plus de 50 %, ce qui implique que l'humidité a un effet majeur sur la charge des particules [19]. D'autre part, il a également été démontré que l'humidité relative réduit l'impact de la charge électrostatique, ce qui met en évidence une interaction complexe entre l'humidité et la charge des particules.

Tout bien considéré, ces résultats démontrent comment l'humidité a un impact majeur sur la façon dont les particules sont chargées dans les précipitateurs électrostatiques, ce qui a des conséquences sur l'efficacité avec laquelle ces particules sont collectées. Étant donné que la composition de la fumée de silice maximale est  $\text{SiO}_2$ , les particules seront influencées par la variation de l'humidité ascendante au cours de cette expérience, donc si nous augmentons l'humidité de 40% à 80%, la collecte de ces particules de ciment sera réduite en raison de leur composition et de leur nature chimique.

**Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans**

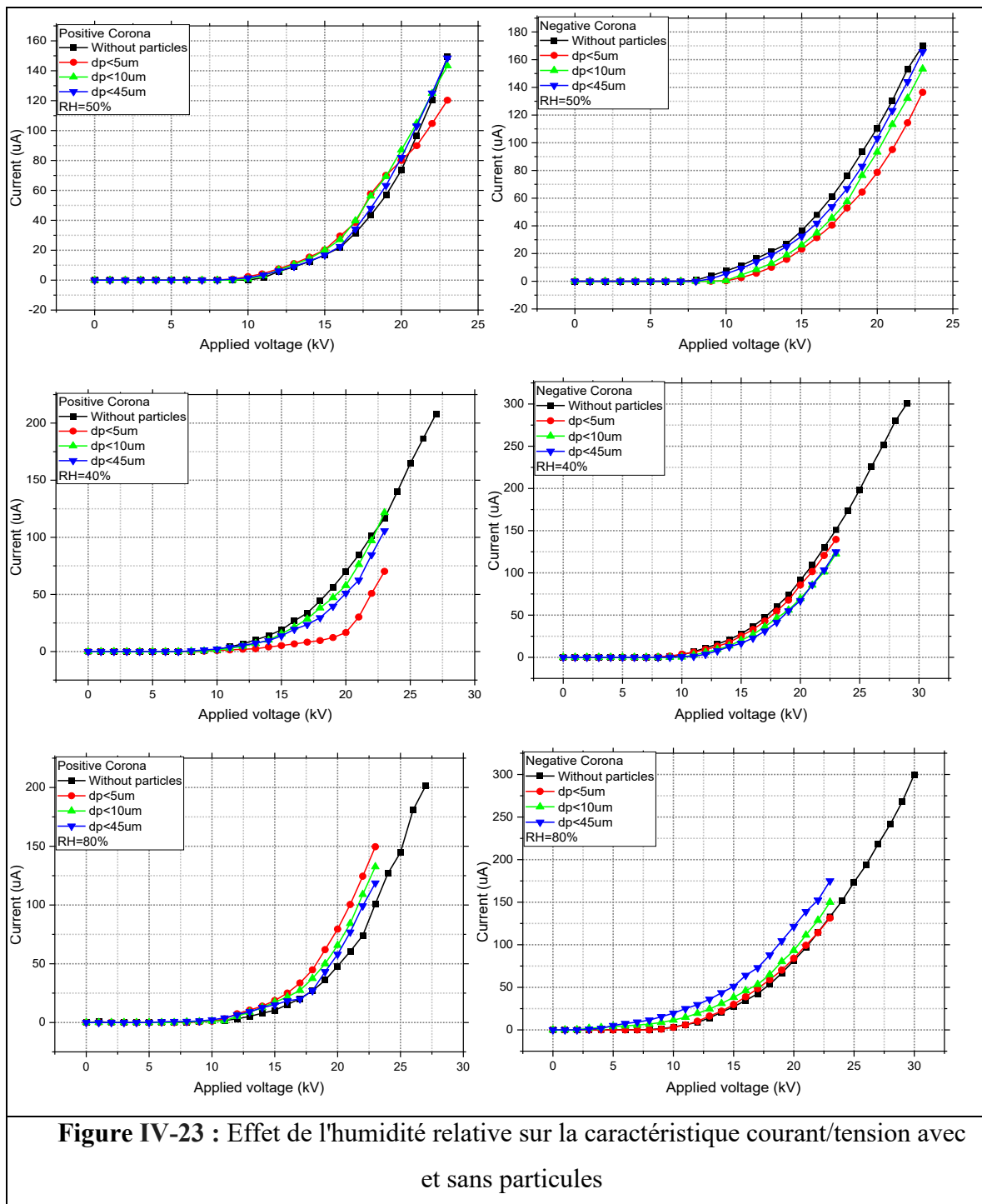


➤ **Effet de l'humidité relative sur la caractéristique courant/tension dans « Ca, SiO<sub>2</sub> et Fe » particules :**

Les caractéristiques courant-tension d'un précipitateur électrostatique (ESP) peuvent être considérablement influencées par l'humidité. Voici quelques considérations essentielles sur la façon dont l'humidité affecte les performances de l'ESP :

Courant déchargé : L'humidité relative (HR) de l'air entrant a un impact significatif sur le courant de décharge. Par exemple, à une tension donnée, l'augmentation des niveaux d'HR entraîne une réduction du courant moyen dans le temps, sauf lorsque l'HR est proche de la saturation [18], La présence d'humidité dans l'entrefer modifie la mobilité ionique et les propriétés courant-tension des ESP. Lorsque l'humidité relative dans l'entrefer augmente à une tension appliquée donnée, le courant corona diminue considérablement [20],

**Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans**



**Figure IV-23 : Effet de l'humidité relative sur la caractéristique courant/tension avec et sans particules**

Les caractéristiques courant-tension mesurées sous une humidité relative variable obéissent à la loi quadratique de Townsend. Lorsque le courant dépasse une valeur seuil particulière  $V_0$  et atteint la tension de claquage, il augmente progressivement avec la tension appliquée. La tension appliquée a un effet non linéaire sur le courant continu circulant via l'espace inter-électrodes. L'humidité a un impact : le modèle de Cooper et la loi quadratique de Townsend peuvent être utilisés pour étudier l'effet de l'humidité sur les caractéristiques

#### ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

courant-tension d'un ESP. L'humidité dans l'entrefer modifie la mobilité ionique et les propriétés courant-tension des ESP. [20]

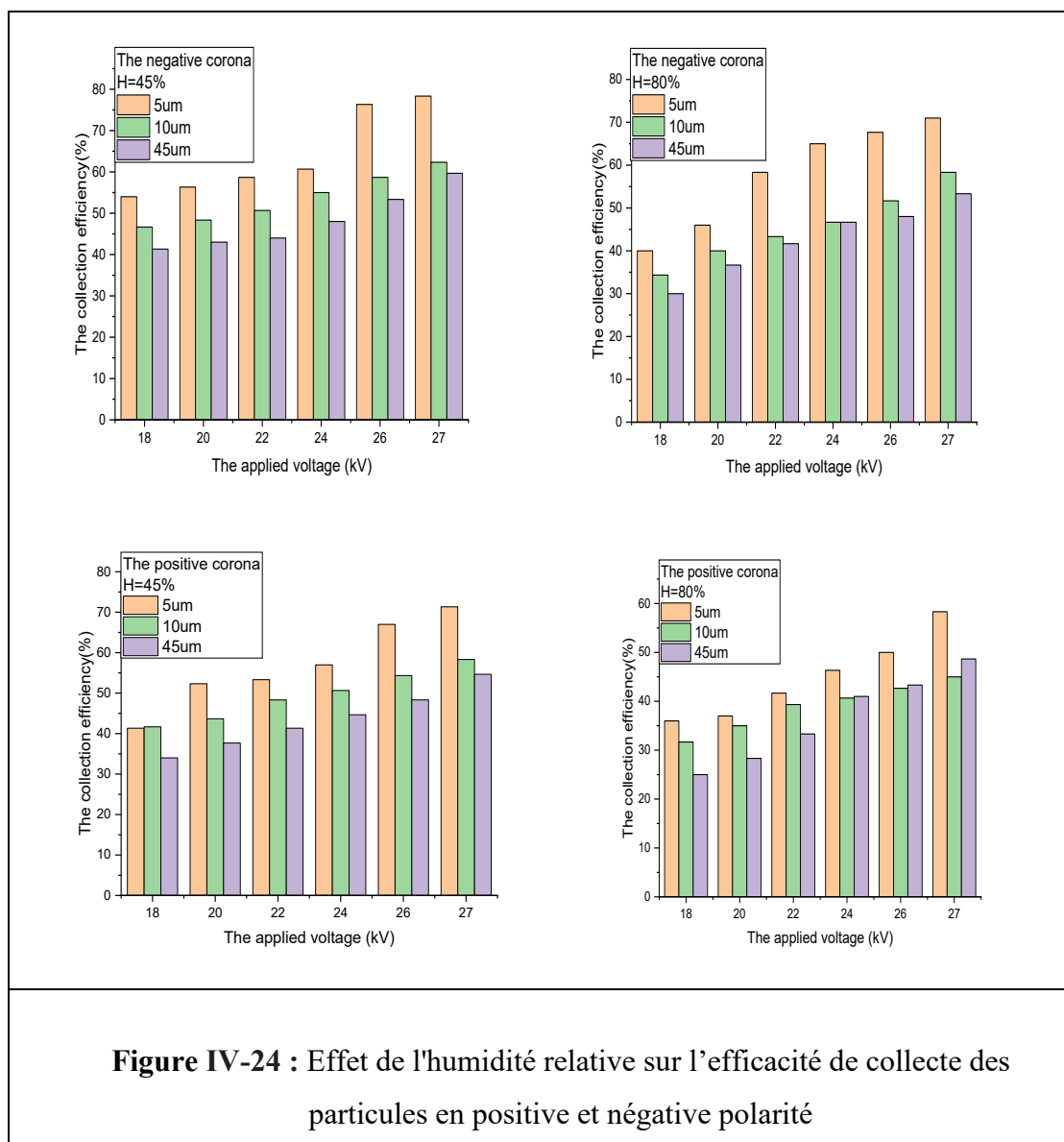
- **Le calcium** les particules sont un constituant important de la poussière de remplissage. La caractéristique courant-tension distinctive d'un précipitateur électrostatique (ESP) peut être affectée par l'hygroscopicité du calcium qui s'y est accumulé. Particules hygroscopiques, y compris celles qui contiennent du calcium.
- De plus, une étude approfondie des caractéristiques hygroscopiques des sels contenant du calcium, tels que  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , a démontré les divers comportements hygroscopiques de ces sels. Les caractéristiques hygroscopiques de divers sels contenant du calcium variaient considérablement, selon les données, suggérant que l'hygroscopicité du calcium peut changer en fonction de la molécule particulière [21]. Les particules atteignent leur courant de décharge maximal lorsque la tension négative augmente pour  $R_h=80\%$ .

**Les particules de SiO<sub>2</sub> et d'Al** constituent la majorité de la composition du métakaolin : l'influence de l'humidité sur les propriétés électriques de l'aluminium anodisé poreux peut être expliquée par un circuit analogue basé sur la structure physique du revêtement d'oxyde poreux. La composante de résistance calculée diminue de manière exponentielle à mesure que l'humidité augmente [22]. De plus, le courant est plus élevé en tension négative appliquée pour  $R_h = 80 \%$ . L'humidité peut avoir un impact considérable sur les caractéristiques électriques de l'aluminium, affectant des paramètres tels que la résistivité, la capacité et la ténacité à la rupture. L'effet de l'humidité sur les propriétés électriques peut être complexe, en fonction de facteurs tels que la présence d'autres substances et la durée d'exposition [23].

#### **IV.9.2 Impact de l'humidité sur l'efficacité de la collecte :**

L'humidité relative et l'efficacité de collecte ont cependant une connexion complexe qui pourrait dépendre d'un certain nombre de variables, notamment le type de précipitateur électrostatique utilisé ainsi que la taille et la composition des particules collectées [26].

**Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans**



**Figure IV-24 : Effet de l'humidité relative sur l'efficacité de collecte des particules en positive et négative polarité**

L'humidité a un impact sur la façon dont les particules de ciment s'hydratent, modifiant des paramètres tels que la résistance à la compression et la façon dont l'eau se transforme en d'autres formes. Les composants du ciment et la présence d'additifs comme les cendres volantes affectent la quantité d'humidité qui affecte l'hydratation du ciment. Les résultats ont montré que l'humidité influence l'hydratation des particules de ciment. L'hydratation des particules de ciment s'arrête lorsque l'humidité relative tombe en dessous de 80 % [24]. Le degré d'hydratation du ciment diminue lorsque l'humidité relative ambiante baisse. La réponse à l'hydratation et l'humidité relative interne [25]. La mobilité moyenne des ions positifs et négatifs de l'air dans la zone de dérive diminue avec l'accroissement de l'humidité relative et croît par contre, avec la tension appliquée à la nappe de fils. La valeur

#### ***Chapitre IV : Étude expérimentale de l'effet des conditions atmosphériques 'humidité-température' sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes- deux plans***

de cette mobilité est bien précisée par l'étude expérimentale et nous avons montré qu'elle dépendait de l'âge des ions et de l'humidité de l'air. Ceci explique, en grande partie, la diversité que l'on trouve sur ces valeurs dans les publications, mais également du fait que les mesures sont généralement effectuées dans des conditions mal connues, notamment de température et de pression[20].

#### **IV.10 Conclusion**

L'étude expérimentale de l'impact des conditions atmosphériques, telles que l'humidité et la température, sur la décharge couronne dans une configuration de précipitateur électrostatique à nappe de pointes-deux plans, a permis de mettre en lumière plusieurs observations importantes.

En premier lieu, la relative humidité a eu un effet important sur la formation et l'intensité de la décharge couronne. La hausse de l'humidité a tendance à diminuer la tension de claquage, ce qui facilite le début des décharges. On peut expliquer ce phénomène par la réduction de la résistivité de l'air en présence d'eau, ce qui augmente l'ionisation et la conductivité du milieu gazeux.

Par la suite, la température ambiante a aussi été significativement influencée par le comportement de la décharge. Effectivement, une augmentation des températures a favorisé l'accélération des électrons dans le champ électrique, ce qui a entraîné une modification de la répartition des porteurs de charge et, par conséquent, des caractéristiques des décharges couronnes.

Par ailleurs, La distribution de la densité de courant produite par ce type d'électrode couronne est hautement non-uniforme. Les résultats obtenus confirment l'importance des conditions atmosphériques dans le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques, notamment dans les milieux industriels. Il est donc essentiel de prendre en considération ces paramètres lors de la conception et de l'utilisation de tels dispositifs, afin d'améliorer leur efficacité et leur performance de captation des particules.

En conclusion, cette étude souligne l'importance de contrôler les conditions météorologiques afin d'améliorer la stabilité et le rendement des systèmes de décharge couronne dans les précipitateurs électrostatique.

- [1] J.H. Lee, H.G. Kim, G.S. Khang, H.B. Lee, M.S. Jhon, "Characterization of wettability gradient surfaces prepared by corona discharge treatment", *Journal of Colloid Interface Science*, Vol. 151, N°. 2, pp. 563-570, 1992.
- [2] X. Li, L. Cai, X. Xu, Z. Wan, X. Ma, Y. Liu, "Analysis on corona discharge electrical characteristics of wind turbine blades", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 60, N°. 1, pp. 91-101, 2019.
- [3] A.Y. Wardaya, M. Nur, J.E. Suseno, "A study of the corona discharge theory for multipoint–plane configurations", *Indian Journal of Physics*, Vol. 94, N°. 3, pp. 409-415, 2020.
- [4] L. Dascalescu, A. Luga, R. Morar, V. Neamtu. I. Suarasan, A. Samuila, D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators", *Journal of Electrostatics*, Vol. 29, N°. 3, pp. 211-225, 1993.
- [5] A. Iuga, R. Morar, L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, "A new type of corona electrode for high-tension separators", *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 4, pp. 75-90, 1993.
- [6] Xuhui Zhang. L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension et les caractéristiques de charge de poussière dans les ESP à basse-basse température. Progrès dans la recherche en ingénierie (AER), volume 169, (MSEEE 2018).
- [7] M. Goldman, A. Goldman et RS Sigmond, La décharge corona, ses propriétés et ses utilisations spécifiques, *Pure & Appli. Chem.*, Vol. 57, No.9, pp. 1353—1362, 1985.
- [8] H. Ait Saïd Analyse expérimentale de la distribution de la densité du courant corona et du champ électrique à des températures variables dans un précipitateur électrostatique. Ingénierie des surfaces et électrochimie appliquée. Volume 58, pages 339–349, (2022).
- [9] Hamdy A.Ziedan, Une mise en œuvre expérimentale et des tests de la décharge corona dans les précipitateurs électrostatiques à conduit métallique affectés par les vitesses des gaz d'écoulement entrants. Mesures. Volume 177, Juin 2021, 109296.
- [10] John R. Bush, Paul L. Feldman et Myron Robinson (1979) Précipitation électrostatique à haute température et haute pression, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 29:4, 365-371.
- [11] L. Dascalescu, A. Mihalcioiu, A., Stochita, P. Notingher, Caractéristiques de décroissance de charge des matériaux granulaires formant des monocouches à la surface des électrodes mises à la terre. Réunion annuelle IEEE/IAS 2004, Hong-Kong, pp. 1414 – 1417.

## *Les références bibliographiques*

- [12] S. Chen, K. Li, S. Nijdam, « Mécanisme de transition des modes corona DC négatifs dans l'air atmosphérique : des impulsions Trichel à la lueur sans impulsion », *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 28, N°. 5, 55017, 2019.
- [13] M. Rong, D. Liu, D. Wang, B. Su, X. Wang, Y. Wu, « Une nouvelle méthode d'optimisation de structure pour la distance inter-aiguilles d'un réacteur à décharge à barrière multi-aiguilles-plan », *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 38, N°. 4, pp. 966-972, 2010.
- [14] M. Abdel-Salam, A. Hashem et E. Sidique. « Caractéristiques de la décharge corona négative dans les configurations à aiguille unique et à aiguille multiple sur plan ». *Revue internationale des sciences et technologies environnementales du plasma*, vol. 7, n° 2, JUILLET 2013
- [15] BS Choi, CAJ Fletcher. Dispersion turbulente de particules dans un précipitateur électrostatique. *Modélisation mathématique appliquée*. Volume 22, numéro 12, Décembre 1998, Pages 1009-102
- [16] Shuran Li, Yifan Huang, Qinzhen Zheng, Guanlei Deng, Keping Yan. Un modèle numérique pour prédire l'efficacité de collecte des particules des précipitateurs électrostatiques. *Technologie des poudres*. Volume 347, 1er avril 2019, pages 170-178
- [17] KR Parker, *Précipitation électrostatique appliquée*. Édition Kluwer Academic Publishers, Londres, pp. 25 – 88, 1997.
- [18] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu et Y. Zebboudj, Effet de l'humidité relative sur les caractéristiques courant-tension d'un précipitateur électrostatique, *J. Electrostat.* 70, pp. 20-24, 2012.
- [19] Chenghang Zheng, Dawei Duan, Qianyun Chang, Shaojun Liu, Zhengda Yang, Xintao Liu, Weiguo Weng, Xiang Gao. Expériences sur l'amélioration des performances de charge de particules d'un précipitateur électrostatique. *Recherche sur les aérosols et la qualité de l'air*, 19 : 1411-1420, 2019
- [20] H. Ait Saida, M. Aissou , H. Nouria et Y. Zebboudj. Analyse de la caractéristique courant-tension lors de la décharge corona dans un précipitateur électrostatique à fils-plans sous humidité de l'air variable. Vol. 135 (2019) *ACTA PHYSICA POLONICA A* No. 3
- [21] L. Guo et al. Une étude approfondie des propriétés hygroscopiques des sels contenant du calcium et du magnésium : implications pour l'hygroscopicité des poussières minérales et des aérosols de sel marin. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 2115–2133, 2019
- [22] Minna Niittymäki et Kari Lahti. Effet de la température et de l'humidité sur les propriétés diélectriques des revêtements d'alumine pulvérisés thermiquement. *Transactions*

IEEE sur les diélectriques et l'isolation électrique. . Juin 2018

- [23] Ibrahim Alqahtani,\*Andrew Starr, etMohammed KhanEffets couplés de la température et de l'humidité sur la ténacité à la rupture de l'alliage Al–Mg–Si–Mn.Matériaux (Bâle).2023 juin; 16(11): 4066
- [24] Soleil de BochaoTakafumi Noguchi b, Gaochuang Cai c, Weijian Zhao. Effet de la température et de l'humidité relative sur le développement de la résistance à la compression du mortier de ciment de la couche superficielle.Construction et matériaux de construction Volume 281, 26 avril 2021, 122626
- [25] Warangkana Saengsoy, Toyoharu Nawa et Pipat Termkhajornkit. Influence de l'humidité relative sur la résistance à la compression de la pâte de ciment à base de cendres volantes. J.Struct Constr, Eng, AIJ, Vol 73 No 631, 1433-1441, septembre 2008
- [26] H. Nouri abc, N. Zouzou, L. Dascalescu a, Y. Zebboudj b. Etude de l'effet de l'humidité relative sur la vitesse des particules et l'efficacité de collecte d'un précipitateur électrostatique à l'échelle du laboratoire. Environnement. Volume, Novembre 2016, Pages 225-232
- [27] S. Chen, K. Li, S. Nijdam, "Transition mechanism of negative DC corona modes in Atmospheric air: from Trichel pulses to pulseless glow", Plasma Sources Science Technology, Vol. 28, N°. 5, 55017, 2019.
- [28] M. Rong, D. Liu, D. Wang, B. Su, X. Wang, Y. Wu, "A new structure optimization method for the inter-needle distance of a multi-needle-to-plane barrier discharge reactor", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, N°. 4, pp. 966-972, 2010.
- [29] J.H. Lee, H.G. Kim, G.S. Khang, H.B. Lee, M.S. Jhon, "Characterization of wettability gradient surfaces prepared by corona discharge treatment", Journal of Colloid Interface Science, Vol. 151, N°. 2, pp. 563-570, 1992.
- [30] A.Y. Wardaya, M. Nur, J.E. Suseno, "A study of the corona discharge theory for multipoint–plane configurations", Indian Journal of Physics, Vol. 94, N°. 3, pp. 409-415, 2020.
- [31] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, M.B. Neagoe, A. Reguig, L. M. Dumitran, "Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a noncontact electrostatic voltmeter", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, N°. 4, pp. 2377-2384, Aug. 2016.
- [32] M.S. Bendilmi, T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "Experimental characterization of electric potential uniformity at the surface of polymer plates corona charged by multiple-row needle-type electrodes ", Journal of Electrostatics, Vol.

## *Les références bibliographiques*

115,103656 (9 pages), January 2022, ISSN : 0304-3886

- [33] B. Neagoe, H.N. Teodorescu, Y. Prawatya, L. Dascalescu, T. Zeghloul, Experimental bench for studying the relation .

*Conclusion générale*

L'objectif de cette étude était d'examiner comment les paramètres atmosphériques influencent le phénomène de décharge couronne dans diverses configurations de précipitateurs électrostatiques. Les précipitateurs électrostatiques, outils essentiels pour réguler la pollution atmosphérique, sont basés sur des mécanismes électro physiques complexes, où la décharge couronne joue un rôle essentiel dans la capacité de captation des particules.

Les travaux menés ont permis de mettre en évidence l'influence de facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité relative, et la pression atmosphérique sur les caractéristiques de la décharge couronne. En combinant des expérimentations systématiques et des modélisations numériques, nous avons montré que ces paramètres modifient non seulement l'intensité et la stabilité de la décharge, mais également la répartition des charges sur les particules en suspension.

Il ressort notamment que :

- Une augmentation de l'humidité favorise la conductivité du milieu, ce qui peut améliorer la captation des particules fines mais, dans certains cas, déstabiliser la décharge couronne.
- La pression atmosphérique influe sur le seuil de déclenchement de la décharge et sur son intensité, ce qui est particulièrement significatif dans les applications à haute altitude.
- La température agit indirectement sur la densité de l'air et la mobilité ionique, influençant ainsi le champ électrique critique et la dynamique des particules.

Par ailleurs, l'analyse comparative des configurations géométriques des précipitateurs a révélé que certaines configurations sont plus robustes face aux variations des paramètres atmosphériques. Ces résultats ouvrent la voie à une optimisation des précipitateurs en fonction des conditions climatiques spécifiques aux environnements industriels.

En conclusion, cette recherche apporte une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres atmosphériques et la décharge couronne dans les précipitateurs électrostatiques. Elle offre des perspectives prometteuses pour améliorer leur conception et leur efficacité, notamment dans des contextes où les conditions environnementales sont sujettes à de fortes variations.

Ces travaux pourraient être prolongés par des études sur de nouveaux matériaux d'électrodes et des configurations innovantes, ainsi que par l'intégration de systèmes adaptatifs capables de s'ajuster en temps réel aux variations des conditions atmosphériques. Ainsi, cette thèse contribue non seulement à la connaissance scientifique du phénomène de décharge couronne, mais également à l'évolution des technologies de

précipitation électrostatique en faveur d'une meilleure protection de l'environnement.

3/ Cette étude expérimentale avait pour objectif d'évaluer et de comparer l'efficacité de collecte des particules dans trois configurations distinctes de précipitateurs électrostatiques à lames-plan. Ces dispositifs, largement utilisés dans l'industrie pour la réduction des émissions de particules, reposent sur des principes électrostatiques complexes où la configuration géométrique des électrodes joue un rôle crucial dans leurs performances.

Les résultats obtenus au terme de cette investigation nous permettent de tirer plusieurs conclusions essentielles :

- **L'efficacité de collecte** varie sensiblement selon la configuration des précipitateurs, démontrant que la géométrie influence directement la répartition du champ électrique, la trajectoire des particules chargées et, par conséquent, les performances globales du dispositif.
- Certaines configurations se sont distinguées par une meilleure homogénéité du champ électrique, minimisant les zones de faible intensité où la collecte des particules devient moins efficace.
- Les paramètres opérationnels tels que la tension appliquée, le débit du gaz, et les caractéristiques des particules (taille et concentration) ont également montré une influence significative sur l'efficacité de collecte dans chacune des configurations étudiées.

Cette recherche a donc révélé des critères essentiels pour améliorer la conception des précipitateurs électrostatiques à lames-plan afin d'optimiser leur efficacité. Les résultats obtenus sont très utiles pour sélectionner la configuration la plus appropriée en fonction des exigences particulières des applications industrielles, en particulier pour la capture des particules fines.

En perspective, il serait pertinent d'approfondir ces travaux en combinant les expérimentations avec des modèles numériques avancés permettant de prédire le comportement des particules et la distribution du champ électrique dans des conditions variées. De plus, l'évaluation des performances sous l'influence d'autres paramètres environnementaux tels que l'humidité, la température et la pression constituerait un prolongement intéressant pour mieux adapter ces dispositifs à des environnements industriels complexes.

En conclusion, cette étude contribue à une meilleure compréhension des mécanismes

qui régissent l'efficacité des précipitateurs électrostatiques à lames-plan. Elle constitue une avancée significative vers l'amélioration des technologies de dépollution en vue de répondre aux exigences croissantes en matière de protection de l'environnement et de respect des normes de qualité de l'air.

Cette conclusion synthétise les principaux résultats, valorise leur portée pratique et propose des perspectives concrètes pour des travaux futurs. Vous pouvez l'adapter en fonction des résultats spécifiques obtenus dans votre étude.

L'objectif de cette étude expérimentale était d'analyser l'effet des conditions atmosphériques, notamment l'humidité et la température, sur la décharge couronne dans une configuration spécifique de précipitateur électrostatique à nappe de pointes et deux plans.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence significative de ces paramètres sur le comportement de la décharge couronne, un phénomène essentiel au fonctionnement des précipitateurs électrostatiques pour la capture des particules en suspension.

Il a été observé que :

- **L'humidité** joue un rôle déterminant en augmentant **la conductivité** du milieu gazeux, ce qui modifie la distribution du champ électrique et favorise, dans certains cas, la stabilisation de la décharge couronne. Toutefois, une humidité excessive peut entraîner des pertes d'efficacité dues à la formation de phénomènes parasites, comme les arcs électriques.
- **La température**, quant à elle, influence indirectement **la mobilité** des ions et la densité de l'air, ce qui modifie le seuil de déclenchement de la décharge ainsi que son intensité. Des températures élevées tendent à réduire la densité de l'air, facilitant ainsi la formation de la couronne, mais diminuant parfois la stabilité du processus.

Par ailleurs, l'étude expérimentale dans la configuration à nappe de pointes – deux plans a montré que cette géométrie présente des caractéristiques avantageuses pour générer une décharge homogène et stable, sous certaines conditions atmosphériques optimisées.

En conclusion, cette étude apporte une contribution notable à la compréhension des interactions entre les paramètres atmosphériques et la décharge couronne dans les précipitateurs électrostatiques. Les résultats obtenus pourront servir de base pour l'optimisation des précipitateurs électrostatiques utilisés dans divers environnements industriels, où les conditions climatiques fluctuent fréquemment.

Pour des perspectives futures, il serait pertinent d'élargir cette étude en explorant d'autres configurations géométriques et en intégrant des conditions plus variées, telles que la pression atmosphérique ou des mélanges gazeux complexes.

De plus, l'utilisation de modèles numériques complémentaires pourrait permettre de prédire avec précision l'effet des paramètres étudiés sur les performances globales des précipitateurs.

**Publication et  
participation à  
des  
manifestations  
scientifiques**

❖ **Publications internationales:**

1. **N. Hebbar**<sup>b</sup>, H. Aitsaid,<sup>d</sup> M. Aissou,<sup>c</sup> , H. Nouri,<sup>e</sup>, and T. Zegloul.<sup>f</sup>. Experimental study of the collection efficiency of three configurations of blades-plates-type electrostatic precipitators. Particulate Science and Technology. 29 Feb 2024
2. H. Ait Said<sup>a, b</sup> ,, M. Aissou<sup>a, c</sup> , A. Laifaoui<sup>a</sup>, **N. Hebbar**<sup>c</sup>, M. Kaci<sup>a</sup>, H. Nouri<sup>a, d</sup>, and Y. Zebboudj<sup>a</sup>. Experimental Analysis of Corona Current Density Distribution and Electric Field at Variable Temperatures in Electrostatic Precipitator. SURFACE ENGINEERING AND APPLIED ELECTROCHEMISTRY. [29 Aout 2022](#).

❖ **Communications internationales :**

1. **N.HEBBAR**<sup>1</sup>, M.AISSOU<sup>2</sup> ,I.BRAKNA<sup>3</sup> . Fine Particle Separation Using an Electrostatic Separator in a wires-Planes Configuration. Second International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences. October 15-18, 2022
2. **N.Hebbar**<sup>\*</sup>, M.Aissou <sup>2</sup> and H.Ait said <sup>3</sup> . The Variation of the Discharge Current in Function of the Internal and External Parameters for Electrostatic Precipitator. First International Conference on Scientific and Academic Research. December 10-13, 2022
3. **N.Hebbar**<sup>\*</sup>, M.Aissou <sup>2</sup> and H.Ait said <sup>3</sup> . The Invistigation of Internal

factors in the Precipitator Point-to-Plan Configuration. Fourth International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences. November 10-13, 2022

4. **N.Hebbar**<sup>\*</sup>, M.Aissou<sup>2</sup> and H.Ait said<sup>3</sup>. Optimizing the Two-Plane Electrostatic Precipitator with a Small Blade for Airborne Particulate Matter Filtration. The second Electrical Engineering International Conference (EEIC'23). December 05-06, 2023

❖ **Communications nationales :**

1. I.BRAKNA<sup>1</sup> , **N.HEBBAR**<sup>2</sup> ,M.AISSOU<sup>3</sup> . Study of a wire-cylinder electro filter for industrial smoke treatment. The 12<sup>th</sup> National Conference on High Voltage Engineering. Octobre 4-6 2022
2. H. Ait Said, A. Laifaoui, M. M. Tounsi, A. Mostefa, M. Aissou, **N. Hebbar**, H. Nouri. Effet de l'épaisseur d'un Ecran Pollué sur la Rigidité Diélectrique d'un Système non Uniforme. The third national conference on applied physics and chemistry. March 12-13, 2023
3. H. Ait Said, A. Laifaoui, M. M. Tounsi, A. Mostefa, M. Aissou, **N. Hebbar**, H. Nouri. Analysis Experimental of Corona Discharge Parameters at Various Temperatures. The third national conference on applied physics and chemistry. March 12-13, 2023